

Modul Kuliah

Pengantar Mesin Berputar: Prinsip, Klasifikasi, dan Parameter Operasi

Mata Kuliah Teknik Pemeliharaan Mesin

Penyusun:

Indra Feriadi

Angga Sateria

Program Studi Teknik Perawatan dan Perbaikan Mesin

Jurusan Rekayasa Mesin

Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

2025

Kata Pengantar

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga **Modul Pengantar Mesin Berputar: Prinsip, Klasifikasi, dan Parameter Operasi** ini dapat disusun dan digunakan sebagai salah satu bahan ajar mata kuliah **Teknik Pemeliharaan Mesin** pada Program Studi D3 Teknik Perawatan dan Perbaikan Mesin, Jurusan Rekayasa Mesin, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung.

Modul ini disusun sebagai bagian dari upaya sistematis program studi dalam meningkatkan kualitas pembelajaran yang berorientasi pada kebutuhan dunia industri dan dunia kerja. Mesin dan peralatan industri, khususnya mesin berputar, memiliki peran strategis dalam menjamin kontinuitas proses produksi. Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif mengenai prinsip kerja, karakteristik operasi, serta teknik pemeliharaan mesin menjadi kompetensi inti yang wajib dikuasai oleh lulusan Program Studi Teknik Perawatan dan Perbaikan Mesin.

Materi dalam modul ini dirancang secara terstruktur dan aplikatif, mencakup konsep dasar mesin berputar, klasifikasi, parameter operasi, hingga pendekatan pemantauan kondisi dan analisis permasalahan yang umum terjadi di lapangan. Penyajian materi diharapkan tidak hanya memperkuat pemahaman konseptual mahasiswa, tetapi juga menumbuhkan kemampuan analitis, sikap teliti, serta kesiapan dalam menghadapi permasalahan nyata di lingkungan industri.

Kami menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada tim penyusun atas dedikasi dan kontribusinya dalam pengembangan modul ini. Kami juga menyadari bahwa modul ini masih memiliki keterbatasan, sehingga masukan dan saran yang konstruktif sangat diharapkan demi penyempurnaan pada edisi berikutnya.

Akhir kata, semoga modul ini dapat dimanfaatkan secara optimal oleh dosen dan mahasiswa sebagai sarana pembelajaran, serta memberikan kontribusi nyata dalam menghasilkan lulusan yang kompeten, profesional, dan siap bersaing di bidang perawatan dan perbaikan mesin.

Sungailiat, November 2025
Ketua Program Studi
D3 Teknik Perawatan dan
Perbaikan Mesin

Daftar Isi

Sampul	i
Kata Pengantar	ii
Daftar Isi	iii
Modul 1: Definisi dan Karakteristik Umum Mesin Berputar	1
1.1 Definisi Mesin Berputar dalam Konteks Industri	2
1.2 Komponen Utama dan Fungsinya	3
1.3 Fenomena Dinamis Dasar yang Harus Dipahami	7
Latihan/Tugas	10
Daftar Pustaka	11
Modul 2: Klasifikasi Mesin Berputar Industri	12
2.1 Klasifikasi Berdasarkan Fungsi dalam Sistem	12
2.2 Klasifikasi Berdasarkan Prinsip Kerja	16
2.3 Klasifikasi Berdasarkan Parameter Desain dan Operasi	20
2.4 Klasifikasi Berdasarkan Kritisitas dan Standar	24
Latihan/Tugas	28
Daftar Pustaka	30
Modul 3: Parameter Operasi dan Monitoring Utama	31
3.1 Parameter Proses Utama	31
3.2 Parameter Mekanis Utama	34
3.3 Parameter Kondisi dan Kinerja	38
3.4 Instrumentasi dan Sistem Monitoring Dasar	42
Latihan/Tugas	46
Daftar Pustaka	48
Lampiran	49
Kunci Jawaban Latihan	49

Modul 1

Definisi dan Karakteristik Umum Mesin Berputar

Capaian Pembelajaran:

Setelah mengikuti pembelajaran dan melakukan diskusi pada modul 1 ini, mahasiswa mampu menerapkan konsep definisi, klasifikasi, dan karakteristik umum mesin berputar untuk mengidentifikasi, mengklasifikasikan, dan menjelaskan prinsip kerja serta potensi permasalahan dasar pada berbagai contoh mesin berputar yang ditemui dalam konteks sistem industri, dengan menunjukkan sikap teliti dan analitis.

1.1 Definisi Mesin Berputar dalam Konteks Industri

Pengertian Mesin Berputar

Menurut American Society of Mechanical Engineers (ASME), mesin berputar (*rotating machinery*) didefinisikan sebagai peralatan mekanis yang memiliki komponen utama bergerak secara rotasi (berputar) pada sumbunya, yang berfungsi untuk memindahkan energi antara komponen mekanis dan fluida (ASME, 2021). Komponen utama yang berputar ini disebut rotor atau impeller. Energi yang dipindahkan dapat berupa konversi dari energi mekanik rotasi menjadi energi fluida (seperti pada pompa dan kompresor) atau sebaliknya, dari energi fluida menjadi energi mekanik rotasi (seperti pada turbin). Inti dari definisi ini adalah gerakan rotasi kontinu, yang menjadi pembeda utama dari jenis mesin lainnya.

Dalam konteks yang lebih luas, Bloch & Geitner (2012) menekankan bahwa mesin berputar adalah tulang punggung (*backbone*) industri proses modern. Keandalan (*reliability*) dan ketersediaannya (*availability*) secara langsung mempengaruhi kontinuitas produksi, efisiensi energi, dan keselamatan operasi pabrik.

Perbandingan dengan Mesin Reciprocating: Karakteristik Kunci

Untuk memahami secara mendalam, mesin berputar perlu dibedakan dari mesin bolak-balik (*reciprocating* atau *positive displacement*). Perbedaan mendasar terletak pada gerakan komponen utamanya dan karakteristik aliran energinya.

Tabel 1.1 Perbandingan Karakteristik Mesin Berputar dan Mesin Reciprocating

Karakteristik	Mesin Berputar (Rotating)	Mesin Bolak-Balik (Reciprocating)
Gerakan Komponen Utama	Rotasi kontinu pada sumbu.	Translasi bolak-balik (naik-turun/maju-mundur).
Prinsip Kerja	Dinamis/Energi Momentum (Turbo-machinery).	Perpindahan Positif (<i>Positive Displacement</i>).

Aliran Fluida	Kontinu dan relatif stabil.	Berdenyut (<i>pulsating</i>).
Contoh Aplikasi	Pompa sentrifugal, kompresor sentrifugal, turbin, motor listrik.	Pompa piston, kompresor reciprocating, mesin diesel.
Keunggulan	Aliran tinggi, perawatan relatif lebih sederhana, getaran lebih rendah.	Tekanan sangat tinggi, efisiensi volumetrik baik pada tekanan tinggi.
Tantangan Umum	Sensitif terhadap kondisi aliran (kavitasi, surge), kecepatan kritis.	Getaran mekanis tinggi, bagian yang bergerak lebih banyak, perawatan rutin intensif.

(Sumber: Disarikan dari Bloch & Geitner, 2012 dan definisi ISO pada kelompok mesin)

Contoh Aplikasi dalam Industri Indonesia

Pemahaman definisi menjadi lebih konkret ketika dikaitkan dengan contoh di lapangan. Mesin berputar ditemui di hampir semua lini industri.

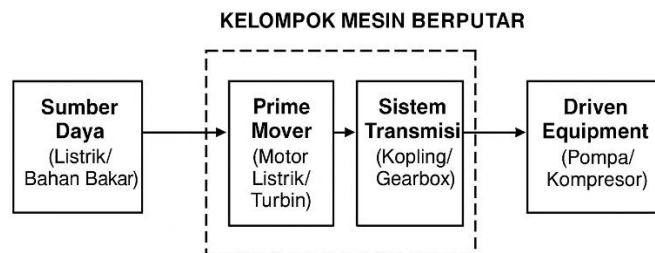
1. Industri Minyak, Gas, dan Petrokimia (Migas): Ini adalah sektor dengan aplikasi mesin berputar paling kritis. Sebuah kilang minyak (refinery) seperti Pertamina RU VI Balongan atau fasilitas LNG Badak, misalnya, bergantung pada ratusan unit mesin berputar. Kompresor sentrifugal digunakan untuk menaikkan tekanan gas alam dalam proses pencairan (liquefaction). Pompa sentrifugal multi-stage berperan vital dalam mensirkulasikan hidrokarbon dan air pendingin di seluruh unit proses. Kegagalan pada satu unit mesin kritis dapat menyebabkan shutdown seluruh pabrik dengan kerugian miliaran rupiah per hari (mengacu pada konsep kritisitas pada standar API 610 dan API 617).
2. Industri Makanan dan Minuman: Penerapannya mungkin lebih sederhana namun tidak kalah penting. Di pabrik susu atau minuman, pompa sentrifugal sanitary (terbuat dari stainless steel dengan finishing halus) digunakan untuk memindahkan cairan seperti susu, sirup, atau jus melalui pipa proses. Motor listrik sebagai penggerak utama dan blower sentrifugal untuk sistem pengeringan atau pengaturan suhu juga merupakan contoh mesin berputar. Kebersihan (hygiene) dan keandalan menjadi fokus utama untuk mencegah kontaminasi dan gangguan produksi.

Peran Vital dalam Sistem Produksi

Mesin berputar bukan beroperasi secara terisolasi, tetapi terintegrasi dalam suatu sistem yang kompleks. Sebagai contoh, dalam sistem pendingin sebuah pabrik:

1. Motor listrik (mesin berputar penggerak) memberikan daya poros.
2. Daya tersebut ditransmisikan melalui kopling (mesin berputar transmisi) ke pompa sentrifugal (mesin berputar proses).
3. Pompa kemudian memindahkan air pendingin ke berbagai peralatan.
4. Performa seluruh sistem ini dimonitor melalui parameter seperti getaran, suhu bantalan, dan tekanan aliran, di mana anomali dapat menjadi indikasi awal masalah (ISO 10816-1:2016 memberikan panduan tingkat getaran yang diizinkan). Pemahaman

bahwa setiap komponen ini adalah bagian dari "mesin berputar" dengan karakteristik dinamisnya sendiri merupakan langkah pertama yang krusial dalam pembelajaran operasi dan perawatan yang efektif.



Gambar 1.1 Klasifikasi Mesin Berputar

DESKRIPSI GAMBAR 3.1: Diagram blok sederhana menunjukkan peran mesin berputar dalam sebuah sistem industri. Diagram terdiri dari: (1) Sumber Daya (Listrik/Bahan Bakar) → (2) Prime Mover (Motor Listrik/Turbin) → (3) Sistem Transmisi (Kopling/Gearbox) → (4) Driven Equipment (Pompa/Kompresor) → (5) Proses Industri. Panah menunjukkan aliran energi.

Rangkuman Poin Kunci

1. Mesin berputar didefinisikan oleh gerak rotasi kontinu dari komponen utamanya (rotor) untuk memindahkan energi.
2. Karakteristik operasinya yang dinamis dan aliran kontinu membedakannya secara fundamental dari mesin reciprocating yang bergerak bolak-balik.
3. Aplikasinya sangat luas, dari industri kritis seperti migas hingga industri konsumen seperti makanan dan minuman.
4. Pemahaman definisi dan peran dasarnya adalah fondasi untuk mempelajari klasifikasi, prinsip kerja, dan strategi pemeliharaan mesin berputar yang lebih kompleks.

1.2 Komponen Utama dan Fungsinya

Pendahuluan

Setiap mesin berputar, terlepas dari jenis dan kompleksitasnya, dibangun dari sekumpulan komponen dasar yang memiliki fungsi spesifik. Memahami setiap komponen ini bukan hanya teori, tetapi merupakan landasan untuk melakukan troubleshooting, perawatan, dan komunikasi teknis yang efektif di lapangan. Kegagalan pada salah satu komponen dapat menyebabkan downtime yang mahal. Misalnya, menurut studi oleh Bloch (2009), sekitar 40% kegagalan mesin berputar terkait langsung dengan sistem bantalan dan seals.

1. Rotor: Jantung yang Berputar

Definisi dan Fungsi:

Rotor adalah komponen inti yang berputar pada sumbunya, berfungsi sebagai media utama transfer energi antara sistem mekanis dan fluida. Pada mesin dinamis (seperti pompa sentrifugal), rotor sering disebut impeller atau runner, sedangkan pada turbin uap/gas

disebut rotor blade assembly. Pada motor listrik, rotor berisi kumparan atau magnet permanen.

Jenis dan Konstruksi:

- 1) Rotor Kaku (Rigid Rotor): Poros dan elemen yang terpasang (impeller, disk) dirancang untuk beroperasi di bawah kecepatan kritis pertamanya. Konstruksinya solid, umum digunakan pada pompa dan motor kecepatan rendah-menengah (di bawah 10.000 RPM). Keseimbangan dilakukan pada dua bidang.
- 2) Rotor Fleksibel (Flexible Rotor): Dirancang untuk beroperasi di atas kecepatan kritis pertamanya, seperti pada turbin uap/gas dan kompresor sentrifugal kecepatan tinggi. Memiliki kemampuan untuk melentur (defleksi) secara dinamis. Memerlukan balancing multi-plane yang presisi (ISO 21940-11, 2017).

Karakteristik Dinamis Kritis:

- Keseimbangan (Balancing): Ketidakseimbangan massa adalah penyebab utama getaran. Rotor harus seimbang secara statis dan dinamis.
- Kecepatan Kritis (Critical Speed): Kecepatan putar di mana frekuensi eksitasi (putaran) beresonansi dengan frekuensi natural dari rotor. Operasi berkepanjangan pada kecepatan ini harus dihindari (Vance, Zeidan, & Murphy, 2010).
- Alignment: Poros rotor harus selaras sempurna dengan poros komponen yang disambung (motor, gearbox) untuk menghindari beban tekuk dan getaran.

2. Stator/Casing: Rumah yang Statis

Fungsi Utama:

Casing adalah komponen stasioner yang membungkus rotor. Fungsinya multifungsi:

- 1) Penahan Tekanan: Menahan perbedaan tekanan antara sisi hisap dan buang (pada pompa/kompresor) atau tekanan tinggi uap/gas (pada turbin). Materialnya harus kuat sesuai standar, seperti baja karbon untuk air atau stainless steel untuk korosif.
- 2) Struktur Pendukung: Menyediakan dudukan (housing) untuk bantalan dan seal. Kekakuan casing sangat mempengaruhi respons dinamis rotor.
- 3) Pengarah Aliran Fluida: Pada mesin dinamis, casing sering dirancang dengan volute (pompa sentrifugal) atau diffuser (kompresor) untuk mengubah energi kinetik fluida menjadi energi tekanan secara efisien. Pada turbin, casing mengarahkan fluida ke sudu-sudu rotor.

Desain dan Konstruksi:

- 1) Casing Terbelah secara Horizontal (Horizontally Split): Memudahkan inspeksi dan perawatan tanpa membongkar sistem perpipaan. Umum pada pompa dan kompresor tekanan menengah.
- 2) Casing Terbelah secara Vertikal (Vertically Split atau Barrel): Digunakan untuk aplikasi tekanan sangat tinggi (misal, kompresor gas untuk kilang minyak). Lebih kuat menahan tekanan radial namun perawatannya lebih kompleks (API 610, 2021).

3. Sistem Bantalan (Bearings): Penyangga dan Peredam

Bantalan berfungsi untuk menahan beban rotor (radial dan aksial), memungkinkan rotasi yang halus dengan gesekan minimal, dan meredam energi vibrasi.

Jenis Utama dan Aplikasi:

Tabel 1.2: Perbandingan Jenis Bantalan Utama pada Mesin Berputar

Jenis Bantalan	Prinsip Kerja	Keunggulan	Keterbatasan	Aplikasi Khas
Bantalan Gelinding (<i>Rolling Element</i>)	Gesekan gulir antara bola/rol dengan race.	Gesekan awal rendah, kemudahan pemasangan, pelumas relatif sederhana.	Kapasitas beban dan kecepatan terbatas, umur terbatas (ada fatigue).	Motor listrik umum, pompa kecil, gearbox.
Bantalan Luncur (<i>Journal/Sleeve Bearing</i>)	Film fluida (oli) memisahkan poros (journal) dan rumah bantalan.	Sangat halus, umur panjang jika dilumasi baik, mampu menahan beban kejut tinggi.	Gesekan awal tinggi, memerlukan sistem pelumas kompleks, rentan jika kecepatan rendah/start-stop.	Turbo-machinery kecepatan tinggi (turbin, kompresor sentrifugal), mesin besar.
Bantalan Aksial (<i>Thrust Bearing</i>)	Menahan beban sejajar poros (aksial).	Spesialis menahan dorongan aksial.	Hanya untuk beban aksial.	Dipasang berpasangan dengan journal bearing pada pompa vertikal atau turbin.

(Sumber: Adaptasi dari Budynas & Nisbett, 2015 dan Bloch, 2009)

Pentingnya Pelumasan: Sistem pelumasan (*oil lubricated* atau *grease*) adalah nyawa bantalan. Kegagalan pelumasan adalah penyebab utama kerusakan bantalan. Monitoring suhu dan kondisi oli/pelumas adalah kegiatan rutin wajib.

4. Sistem Paking (Seals): Penahan Kebocoran

Seals berfungsi untuk mencegah atau membatasi kebocoran fluida proses dari dalam casing (yang bertekanan tinggi) ke lingkungan luar (tekanan rendah), atau mencegah udara masuk ke sistem vakum. Juga berfungsi mencegah kontaminasi.

Klasifikasi Dasar dan Aplikasi:

- 1) Static Seals: Digunakan antara dua komponen yang tidak bergerak relatif satu sama lain, seperti gasket antara dua flange casing.
- 2) Dynamic Seals: Digunakan antara komponen yang bergerak (rotor) dan yang diam (casing).
 - Contact Seals (Bersentuhan): Seperti Mechanical Seal, yang menggunakan sepasang ring (stasioner dan berputar) yang bersentuhan dan dilumasi oleh film fluida tipis. Sangat efektif untuk kebocoran minimal, digunakan pada pompa kimia dan air. Perlu sistem pendukung (flush, quench).

- **Non-Contact Seals (Tidak Bersentuhan):** Seperti Labyrinth Seal (banyak celah berliku) dan Carbon Ring Seal. Mengandalkan banyak celah sempit untuk menciptakan resistance aliran. Tahan lama, toleransi terhadap misalignment, tetapi selalu ada kebocoran kecil (leakage). Umum pada turbin uap/gas dan kompresor.

Pemilihan Seal bergantung pada tekanan, kecepatan, temperatur, dan sifat fluida (apakah abrasif, korosif, atau beracun). Kegagalan seal dapat menyebabkan polusi, kehilangan produk, atau bahaya keselamatan.

5. Sistem Kopling dan Alignment: Penyambung Tenaga

Kopling (Coupling):

Kopling menghubungkan poros dua mesin (misal, motor ke pompa) untuk mentransmisikan torsi. Selain itu, kopling yang baik juga mengakomodasi:

- Misalignment (ketidaksejajaran): Paralel, angular, dan aksial.
- End Float (gerakan aksial poros).
- Getaran dan Torsi Torsional.

Jenis umum termasuk kopling kaku (hanya untuk sistem yang perfectly aligned), kopling fleksibel (menggunakan elemen karet/logam fleksibel), dan kopling fluida (menggunakan cairan untuk transmisi torsi, memberikan start yang halus).

Alignment (Kesejajaran):

Proses menyelaraskan sumbu poros penggerak dan yang digerakkan sehingga mereka membentuk satu garis lurus yang ideal saat beroperasi. Misalignment adalah penyebab utama getaran dan kegagalan bantalan/ seal. Terdapat dua metode utama:

- 1) Alignment Rough (menggunakan mistar siku/feeler gauge).
- 2) Alignment Presisi (menggunakan dial indicator atau laser alignment tool). Laser alignment kini menjadi standar industri karena kecepatan dan akurasinya (Mobley, 1999).

Rangkuman dan Kaitannya dengan Operasi

Kelima komponen universal ini bekerja dalam sebuah ekosistem yang saling bergantung. Misalignment akan membebani bantalan, yang kemudian bisa merusak seal. Getaran dari rotor yang tidak seimbang merambat melalui bantalan dan casing. Oleh karena itu, pemahaman fungsi setiap komponen memberikan dasar kuat untuk analisis akar masalah (root cause analysis) dalam pemeliharaan mesin berputar.

Poin Kunci Operasional:

1. Rotor adalah sumber gerak dan getaran; keseimbangannya kritis.
2. Casing harus kokoh dan tidak boleh mengalami distorsi.
3. Bantalan adalah komponen yang paling sering gagal; monitoring suhu dan vibrasi wajib.
4. Seal adalah garda terakhir pencegah kebocoran; pemilihan dan perawatan yang tepat sangat penting.

5. Kopling dan alignment yang buruk adalah pembunuh diam-diam (silent killer) bagi bantalan dan seal.

1.3 Fenomena Dinamis Dasar yang Harus Dipahami

Pendahuluan: Mengapa Fenomena Dinamis Penting?

Dalam operasi mesin berputar, pemahaman fenomena dinamis bukanlah ilmu teori semata, melainkan kunci untuk mencegah kegagalan katastropik. Getaran yang berlebihan adalah gejala utama dari masalah dinamis dan merupakan penyebab langsung dari 30% kegagalan mesin berputar di industri (menurut data dari Vibration Institute, 2019). Fenomena ini bersifat universal, terjadi pada semua jenis mesin berputar, dari pompa air sederhana hingga turbin gas berkecepatan tinggi. Pemahaman dasar ini membekali teknisi dengan kemampuan untuk melakukan predictive maintenance yang efektif.

1. Konsep Keseimbangan Statis dan Dinamis (ISO 1940)

Definisi dan Perbedaan:

Ketidakseimbangan (unbalance) terjadi ketika pusat massa rotor tidak bertepatan dengan sumbu rotasinya, menyebabkan gaya sentrifugal yang berfluktuasi selama putaran. Gaya inilah yang memicu getaran.

- Keseimbangan Statis (Static Balance): Disebut juga keseimbangan satu bidang. Kondisi dimana pusat massa rotor berada pada sumbu rotasi, sehingga rotor tidak cenderung berputar karena beratnya sendiri saat disangga secara horizontal. Cukup untuk rotor yang tipis/lebar bidang kecil (seperti roda gila/flywheel). Metode pemeriksaan dengan menggulirkan rotor di atas rel paralel.
- Keseimbangan Dinamis (Dynamic Balance): Keseimbangan dua bidang atau lebih. Kondisi dimana resultan gaya sentrifugal dan momen kopel yang dihasilkan oleh distribusi massa yang tidak merata adalah nol. Diperlukan untuk rotor yang panjang/lebar (seperti poros turbin, rotor motor listrik). Keseimbangan dicapai dengan menambah atau mengurangi massa pada dua bidang koreksi yang berbeda.

Standar Kualitas: ISO 1940-1

Standar internasional ini mengklasifikasikan rotor berdasarkan balance quality grade (G), dari G 0.4 untuk rotor presisi sangat tinggi (seperti cakram hard drive) hingga G 4000 untuk mesin diesel kapal besar. Untuk pompa sentrifugal dan motor listrik umum, grade yang biasa diterapkan adalah G 6.3 atau G 2.5. Nilai ini menentukan besarnya unbalance residual yang diizinkan setelah balancing, yang dihitung berdasarkan berat rotor dan kecepatan operasinya. Penerapan standar ini di industri Indonesia, misalnya pada bengkel balancing di Cikarang atau Surabaya, menjadi jaminan kualitas perawatan mesin (ISO 21940-11, 2017).

2. Pengertian Kecepatan Kritis dan Resonansi

Konsep Fundamental:

Setiap rotor yang disangga oleh bantalan memiliki satu atau lebih frekuensi natural (bawaan), di mana ia cenderung bergetar secara alami jika diganggu. Kecepatan Kritis (Critical Speed) adalah kecepatan putar (dalam RPM) di mana frekuensi eksitasi putaran (1X RPM) bertepatan dengan salah satu frekuensi natural sistem rotor-bantalan ini.

Apa yang Terjadi Saat Resonansi?

Ketika mesin beroperasi pada atau sangat dekat dengan kecepatan kritisnya, terjadi fenomena resonansi. Amplitudo getaran akan membesar secara dramatis karena energi dari putaran terus-menerus ditambahkan ke sistem pada frekuensi yang tepat. Hal ini dapat menyebabkan:

- Getaran destruktif yang merusak bantalan, seal, dan bahkan struktur dasar.
- Kebisingan tinggi.
- Kelelahan material dan kegagalan poros (shaft failure).

Pendekatan Desain dan Operasi:

Rotor dirancang agar kecepatan operasi normalnya tidak berada pada zona kritis. Aturan praktisnya:

- Untuk rotor kaku (rigid): Kecepatan operasi $< 75\%$ dari kecepatan kritis pertama.
- Untuk rotor fleksibel (flexible): Kecepatan operasi $> 125\%$ dari kecepatan kritis pertama.

Transient (lalu-lintas) melalui kecepatan kritis saat start-up atau shutdown harus dilakukan dengan cepat untuk meminimalkan waktu paparan getaran tinggi (Vance, Zeidan, & Murphy, 2010). Di PLTGU Jawa Barat misalnya, prosedur start-up turbin gas sangat ketat mengatur percepatan putaran untuk melewati zona kritis dengan aman.

3. Jenis-Jenis Getaran Karakteristik dan Penyebabnya

Analisis pola getaran (vibration signature) adalah alat diagnostik utama. Setiap masalah mekanis menghasilkan pola frekuensi getaran yang unik.

Tabel 1.3. Jenis-Jenis Getaran Karakteristik pada Mesin Berputar

Penyebab Getaran	Frekuensi Dominan	Ciri Khas / Gejala	Aksi Perbaikan
Unbalance (Ketidakseimbangan)	1X RPM	Amplitudo terbesar pada arah radial. Fase stabil. Meningkatkan proporsional dengan kuadrat kecepatan.	Dynamic balancing.
Misalignment (Ketidaksejajaran)	1X dan 2X RPM (terkadang 3X).	Amplitudo tinggi aksial (pada kopling). Fase berbeda 180° pada bantalan yang berseberangan.	Koreksi alignment dengan laser.
Looseness (Ke-longgaran Mekanis)	1X, 2X, dan banyak harmonik (0.5X, 3X, dll)	Getaran tidak stabil, banyak harmonik frekuensi. Sering disertai noise "mechanical knocking".	Periksa dan kencangkan baut foundation, dudukan bantalan, dll.

Bearing Defect (Kerusakan Bantalan Gelinding)	<i>Ball Pass Frequency</i> (BPFO, BPFI)	Getaran impulsif dengan frekuensi tinggi. Muncul puncak spektrum pada frekuensi karakteristik bantalan.	Ganti bantalan. Analisis lebih lanjut.
Electrical Problem (Motor)	1X Slip Frequency	Getaran pada frekuensi listrik (50/60 Hz) atau sidebands-nya. Sering hilang saat listrik diputus.	Periksa kondisi rotor/stator motor, air gap, dll.

(Sumber: Dikembangkan dari bahan pelatihan Vibration Institute dan Bently Nevada, 2018)

4. Stabilitas Rotor: Whip dan Whirl

Ini adalah fenomena ketidakstabilan mandiri (self-excited vibration) di mana getaran dapat tumbuh besar meskipun rotor sudah seimbang dengan baik. Getaran ini terjadi pada frekuensi natural sistem, bukan pada kelipatan RPM.

1) Oil Whirl dan Oil Whip (pada Journal Bearing):

- Oil Whirl: Ketidakstabilan yang disebabkan oleh gaya minyak yang bersirkulasi dalam celah bantalan luncur. Getaran terjadi pada frekuensi sekitar 42-48% dari kecepatan putaran (0.42X - 0.48X RPM). Amplitudo mungkin naik-turun (limit cycle).
- Oil Whip: Ketika kecepatan putaran mencapai sekitar 2x kecepatan kritis rotor, frekuensi oil whirl akan "terkunci" (lock in) pada frekuensi natural rotor. Getaran menjadi sangat kuat dan destruktif. Whip bersifat subsynchronous (di bawah frekuensi putaran).

2) Aliran Uap/ Gas (Steam/ Gas Whirl): Gaya aerodinamis atau hidrodinamis tidak merata di sekitar rotor (misal, di labirin seal turbin) dapat menyebabkan ketidakstabilan serupa. Ini menjadi tantangan utama pada desain turbin uap/gas berdaya tinggi.

Dampak dan Solusi:

Ketidakstabilan ini sangat berbahaya karena dapat menyebabkan kegagalan total dalam hitungan menit. Solusi desain meliputi penggunaan bearing tilting-pad (lebih stabil terhadap oil whirl), pengubahan clearance seal, atau penambahan squeeze film damper. Dalam operasi, mengurangi beban atau mengubah parameter proses (tekanan, aliran) kadang dapat meredam ketidakstabilan sementara.

Rangkuman dan Aplikasi dalam Pemeliharaan

Memahami fenomena dinamis dasar ini mengubah pendekatan pemeliharaan dari sekadar mengganti bagian yang rusak (reactive) menjadi menganalisis akar penyebab (root cause analysis). Sebagai contoh, jika sebuah pompa sentrifugal di pabrik kertas di Riau terus menerus menggagalkan mechanical seal, teknisi yang memahami dinamika akan memeriksa:

1. Apakah getaran tinggi akibat unbalance atau misalignment (menggunakan vibration analyzer)?
2. Apakah kecepatan operasi dekat dengan zona kritis?
3. Apakah ada gejala whirl pada spektrum getaran?

Dengan demikian, perbaikan tidak hanya pada seal-nya, tetapi pada penyebab dinamis yang merusaknya. Pemahaman ini adalah fondasi dari Condition-Based Maintenance yang efektif dan efisien.

Poin Kunci Praktis:

1. Balancing yang tepat (sesuai ISO 1940) adalah langkah pertama pencegahan getaran.
2. Kenali dan hindari zona kecepatan kritis selama operasi normal.
3. Setiap pola getaran adalah "bahasa" mesin yang memberi tahu kita apa yang salah.
4. Ketidakstabilan rotor (whip/whirl) adalah kondisi darurat yang memerlukan tindakan segera.

LATIHAN

1. Menurut Bloch & Geitner (2012), mesin berputar memiliki komponen utama yang berputar disebut _____, yang berfungsi untuk memindahkan energi. Komponen ini bergerak secara _____, yang menjadi ciri pembeda utama dari mesin bolak-balik (*reciprocating*).
2. Sebuah unit peralatan di pabrik berfungsi untuk menaikkan tekanan udara. Alat ini digerakkan oleh motor listrik. Berdasarkan arah aliran energinya, alat ini tergolong ke dalam kategori _____ (*driven machinery*). Contoh spesifik dari alat tersebut adalah _____.
3. Dalam sistem bantalan pada mesin berputar, terdapat komponen yang disebut _____. Fungsi utamanya adalah untuk mencegah atau mengurangi kebocoran fluida antara bagian yang berputar dan yang diam.
4. Jika sebuah pompa sentrifugal mulai bergetar kuat pada kecepatan operasi tertentu, dan getaran berkurang saat kecepatannya dinaikkan atau diturunkan, maka gejala tersebut sangat mungkin terkait dengan fenomena _____. Operasi yang terus-menerus pada kondisi ini berbahaya karena dapat menyebabkan _____.
5. Sebutkan DUA dari TIGA parameter utama yang dimonitor dalam condition monitoring mesin berputar untuk mendeteksi potensi kerusakan!

DAFTAR PUSTAKA

1. ASME. (2021). Pump Testing Standard: ASME PTC 8.2-2021. The American Society of Mechanical Engineers.
2. Bloch, H. P., & Geitner, F. K. (2012). Major Process Equipment Maintenance and Repair (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
3. Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2015). Shigley's Mechanical Engineering Design (10th ed.). McGraw-Hill Education.
4. Ehrich, F. F. (1992). Handbook of Rotordynamics. McGraw-Hill.
5. ISO 21940-11. (2017). Mechanical vibration — Rotor balancing — Part 11: Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour. International Organization for Standardization.
6. Rao, S. S. (1996). Mechanical Vibrations (3rd ed.). Addison-Wesley.
7. Sayers, A. T. (1990). Hydraulic and Compressible Flow Turbomachines. McGraw-Hill.
8. Vance, J., Zeidan, F., & Murphy, B. (2010). Machinery Vibration and Rotordynamics. John Wiley & Sons, Inc.

Modul 2

Klasifikasi Mesin Berputar Industri

Capaian Pembelajaran:

Setelah menyelesaikan Modul 2 ini, mahasiswa **mampu mengklasifikasikan, menjelaskan, dan menganalisis secara terbatas** berbagai jenis mesin berputar industri berdasarkan fungsi, prinsip kerja, parameter desain–operasi, serta tingkat kritisitasnya, sebagai dasar pengambilan keputusan teknis dalam operasi dan pemeliharaan mesin.

2.1 Klasifikasi Berdasarkan Fungsi dalam Sistem

Pendahuluan: Pentingnya Klasifikasi Fungsional

Dalam sebuah pabrik atau fasilitas industri, mesin-mesin berputar tidak bekerja secara terisolasi. Mereka terintegrasi dalam suatu sistem yang saling terhubung untuk menjalankan suatu proses produksi. Klasifikasi berdasarkan fungsi membantu insinyur dan teknisi memahami "peran" setiap mesin dalam sistem tersebut, yang pada gilirannya mempengaruhi strategi pemilihan, desain, operasi, dan pemeliharaannya. Pemahaman ini sangat kritis, terutama dalam industri proses seperti kilang minyak, pabrik kimia, atau pembangkit listrik, di mana setiap komponen harus bekerja sinergis untuk mencapai keandalan (reliability) dan ketersediaan (availability) tinggi (Bloch & Geitner, 2012).

1. Prime Movers (Pembangkit Daya)

Definisi dan Peran: Prime Mover adalah mesin berputar yang berfungsi mengubah energi dari suatu sumber primer menjadi energi mekanik putar (usaha poros). Mereka adalah titik awal dari rantai konversi energi dalam sebuah sistem dan berperan sebagai penggerak utama (driver) bagi mesin-mesin lainnya.

Jenis dan Aplikasi Khas:

- Turbin Uap: Menggunakan energi termal uap bertekanan tinggi untuk memutar rotor. Merupakan jantung dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) seperti PLTU Suralaya atau Paiton. Uap dari boiler menggerakkan turbin yang kemudian dikopel dengan generator.
- Turbin Gas: Beroperasi berdasarkan siklus Brayton, membakar bahan bakar (gas alam/minyak) untuk menghasilkan gas panas berkecepatan tinggi yang memutar rotor. Menjadi penggerak utama di PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap) seperti PLTGU Muara Karang atau Grati.
- Turbin Hidro: Memanfaatkan energi kinetik dan potensial air dari bendungan atau sungai (seperti pada PLTA Singkarak atau Cirata) untuk menghasilkan daya poros.
- Motor Bakar (Internal Combustion Engine): Mesin diesel atau gas engine yang banyak digunakan sebagai penggerak utama untuk generator set (genset) darurat, kompresor di lokasi terpencil, atau kapal.

Ciri Khusus: Prime mover memiliki karakteristik torsi-kecepatan yang unik dan sering memerlukan sistem kontrol kecepatan (governor) yang canggih. Kinerjanya sangat mempengaruhi efisiensi keseluruhan sistem.

2. Driven Machinery (Mesin Proses)

Definisi dan Peran: Driven Machinery adalah mesin berputar yang mengonsumsi energi mekanik putar dari prime mover untuk melakukan kerja pada suatu fluida (gas, cair, atau slurry). Mereka merupakan "tangan" dari sistem yang secara langsung memanipulasi fluida proses.

Jenis dan Aplikasi Khas:

- Pompa: Meningkatkan energi tekanan cairan. Contohnya, pompa sentrifugal multi-stage untuk injeksi air pada lapangan minyak (waterflooding) di Rokan, atau pompa positive displacement untuk transfer minyak mentah.
- Kompresor: Meningkatkan energi tekanan gas. Kompresor sentrifugal digunakan dalam proses pencairan gas alam di Tangguh LNG, sedangkan kompresor reciprocating digunakan untuk gas lift di sumur-sumur minyak.
- Kipas (Fan) dan Blower: Memindahkan gas dengan kenaikan tekanan yang relatif rendah. Kipas aksial besar untuk pendingin menara (cooling tower) di pabrik pupuk, atau blower untuk aerasi di instalasi pengolahan air limbah.

Hubungan dengan Prime Mover: Driven machinery hampir selalu dikopel dengan sebuah prime mover. Pasangan ini harus dipilih dengan cermat agar cocok dalam hal daya, kecepatan, dan karakteristik torsi untuk menghindari masalah operasi seperti overload atau stall.

3. Power Transmission Equipment (Peralatan Transmisi Daya)

Definisi dan Peran: Kelompok ini terdiri dari mesin berputar yang berfungsi untuk menyalurkan dan/atau memodifikasi energi mekanik putar antara prime mover dan driven machinery. Mereka tidak mengubah bentuk energi, tetapi mengoptimalkan penyampaian.

Jenis dan Aplikasi Khas:

- Gearbox (Reductor/ Speed Increaser): Mengubah kecepatan dan torsi poros sesuai kebutuhan. Gearbox pereduksi (reduction gear) sangat umum, misalnya untuk mengurangi kecepatan motor listrik 1500 RPM menjadi kecepatan pompa sentrifugal 300 RPM di sistem air pendingin pabrik. Gearbox peningkat (speed increaser) digunakan pada beberapa aplikasi kompresor sentrifugal.
- Kopling (Coupling): Menghubungkan dua poros untuk mentransmisikan torsi sekaligus mengakomodasi ketidaksejajaran (misalignment), pergerakan aksial (end float), dan getaran torsional. Kopling fleksibel (menggunakan elemen karet/logam) banyak digunakan di hampir semua sambungan mesin.

Pentingnya dalam Sistem: Peralatan transmisi daya yang tidak tepat dapat menyebabkan inefisiensi, getaran berlebih, dan kegagalan prematur pada bantalan baik di driver maupun driven equipment.

4. Supporting Rotating Equipment

Definisi dan Peran: Mesin dalam kategori ini berfungsi sebagai penggerak pembantu atau pendukung yang menggerakkan peralatan non-proses atau sistem utilitas. Mereka seringkali merupakan mesin listrik yang tersebar luas di seluruh pabrik.

Contoh Utama: Motor Listrik sebagai Driver: Motor listrik adalah prime mover yang paling umum, tetapi dalam konteks klasifikasi fungsional sistem proses, ia sering dikategorikan sebagai supporting equipment karena perannya yang spesifik.

- Aplikasi: Motor listrik menggerakkan pompa sirkulasi air pendingin (cooling water pump), pompa transfer bahan kimia, kipas pada Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC), konveyor, dan mixer.
- Spesifikasi: Berbeda dengan turbin besar, motor listrik untuk aplikasi pendukung ini biasanya berukuran lebih kecil, terstandarisasi, dan memiliki desain yang lebih umum (general purpose).

Konteks Kritisitas: Meskipun disebut "pendukung", kegagalan peralatan ini dapat mengakibatkan gangguan proses tidak langsung. Misalnya, kegagalan motor penggerak pompa air pendingin untuk heat exchanger dapat menyebabkan shutdown seluruh unit proses karena overheating.

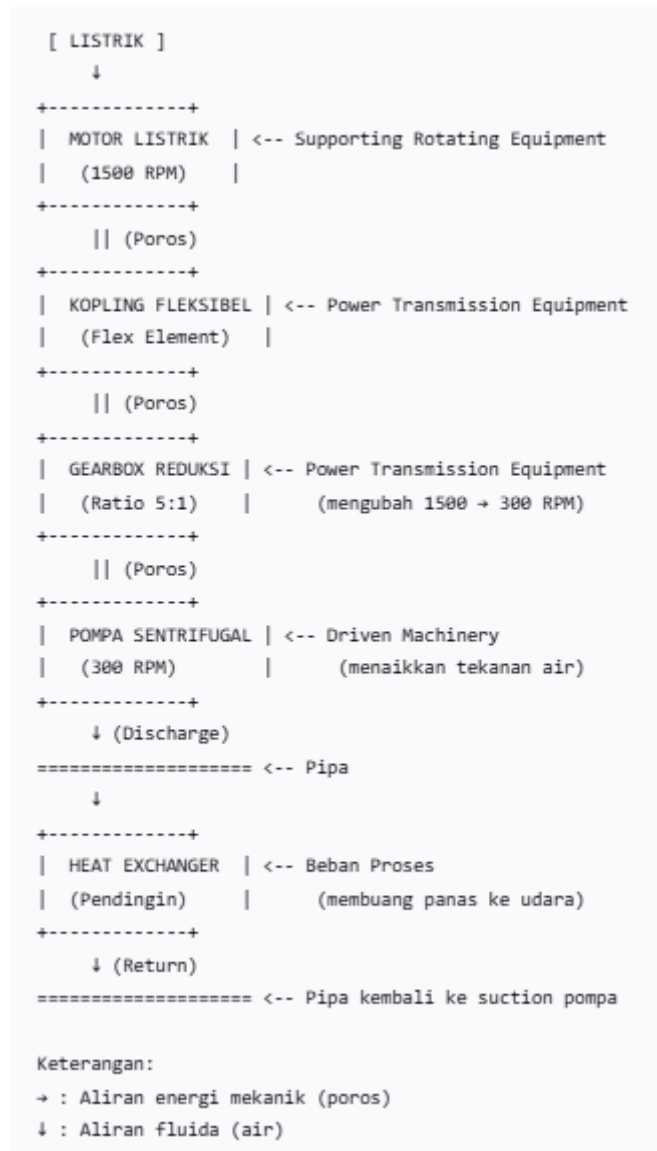
Integrasi dalam Sistem: Sebuah Contoh Konkret

Deskripsi Gambar 3.4: Diagram skematis sistem pendingin sederhana di sebuah pabrik. Diagram menunjukkan aliran energi dan peran fungsional: (1) Motor Listrik (Supporting Rotating Equipment) sebagai sumber daya. (2) Kopling Fleksibel (Power Transmission Equipment) menyambungkannya. (3) Gearbox Reduksi (Power Transmission Equipment) menurunkan kecepatan. (4) Pompa Sentrifugal (Driven Machinery) yang memompa air. (5) Sistem perpipaan dan heat exchanger sebagai beban proses. Panah menunjukkan aliran energi dari listrik menjadi peningkatan energi tekanan air.

Contoh Kasus di Industri: Pada sistem injeksi air (water injection) di lapangan minyak lepas pantai, air laut dipompa ke reservoir untuk menjaga tekanan. Sistem ini terdiri dari:

- Prime Mover: Turbin gas yang memanfaatkan gas dari sumur produksi sebagai bahan bakar.
- Power Transmission Equipment: Gearbox dan kopling antara turbin dan pompa.
- Driven Machinery: Pompa plunger bertekanan tinggi (positive displacement) yang menginjeksikan air ke reservoir.
- Supporting Equipment: Motor listrik kecil untuk pompa pelumas dan sistem kontrol turbin.

Pemahaman klasifikasi fungsional membantu tim maintenance untuk mengelola suku cadang, prosedur operasi, dan prioritas perbaikan yang berbeda untuk setiap kategori mesin dalam sistem yang sama.



Gambar 2.1 Diagram skematis sistem pendingin sederhana

Rangkuman dan Implikasi Praktis

Tabel 2.1 Ringkasan Klasifikasi Berdasarkan Fungsi

Kategori	Fungsi Utama	Contoh	Pertimbangan Kunci dalam Operasi & Perawatan
Prime Movers	Menghasilkan usaha poros dari sumber energi primer.	Turbin Uap/Gas, Mesin Diesel.	Efisiensi konversi, kontrol kecepatan, kualitas bahan bakar/fluida kerja.

Driven Machinery	Meningkatkan/memindahkan energi fluida menggunakan usaha poros.	Pompa, Kompresor, Fan.	Kinerja terhadap kurva, NPSH (pompa), surge (kompresor), kondisi fluida.
Power Transmission	Menyalurkan & memodifikasi usaha poros (torsi/kecepatan).	Gearbox, Kopling.	Alignment, pelumasan, backlash (gearbox), kondisi elemen fleksibel.
Supporting Equipment	Menggerakkan sistem pendukung/utilitas.	Motor Listrik (untuk aplikasi pendukung).	Starter/proteksi listrik, beban, efisiensi energi.

Klasifikasi fungsional ini merupakan langkah pertama yang penting sebelum masuk ke klasifikasi yang lebih teknis (seperti prinsip kerja). Seorang teknisi atau operator yang memahami peran setiap mesin dalam sistemnya akan lebih mampu:

1. Mengantisipasi Dampak Gangguan: Kegagalan prime mover menghentikan seluruh sistem, sementara kegagalan supporting equipment mungkin hanya mengurangi efisiensi.
2. Melakukan Troubleshooting yang Sistematis: Menganalisis masalah dari hulu (prime mover) ke hilir (driven machinery).
3. Berkomunikasi dengan Efektif: Menggunakan terminologi yang tepat saat melaporkan masalah, misalnya, "driver motor listrik untuk pompa P-101A overheating," bukan sekadar "motornya panas."

Pemahaman ini adalah fondasi untuk mengelola aset mesin berputar secara holistik dan efektif.

2.2 Klasifikasi Berdasarkan Prinsip Kerja

Pendahuluan: Dua Filosofi Kerja yang Berbeda

Setelah memahami fungsi mesin dalam sistem, langkah klasifikasi berikutnya yang sangat kritis adalah berdasarkan prinsip kerja atau cara mesin tersebut mentransfer energi antara rotor dan fluida. Pemilihan prinsip kerja yang tepat menjadi penentu utama efisiensi, biaya operasi, dan keandalan dalam aplikasi spesifik. Secara fundamental, terdapat dua filosofi utama: mesin dinamis (turbo-machinery) yang bekerja berdasarkan perubahan momentum fluida secara kontinu, dan mesin perpindahan positif yang bekerja dengan menjebak dan memindahkan volume fluida secara siklis (Lakshminarayana, 1996). Pemahaman mendalam tentang perbedaan ini adalah kunci untuk seleksi peralatan yang optimal.

1. Mesin Dinamis/Turbo-machinery

Prinsip Kerja Dasar:

Mesin dinamis mentransfer energi melalui aksi dinamis antara sudu-sudu rotor yang berputar dengan fluida yang mengalir secara kontinu. Energi diberikan kepada fluida (pada

pompa/kompresor) atau diambil dari fluida (pada turbin) dalam bentuk peningkatan atau penurunan tekanan dan kecepatan. Aliran fluida bersifat steady dan tidak terputus.

Klasifikasi Berdasarkan Arah Aliran Fluida:

- 1) Aliran Radial/Sentrifugal: Fluida masuk secara aksial ke mata impeler dan dikeluarkan secara radial (tegak lurus sumbu). Karakteristiknya memberikan head/tekanan tinggi per tingkat dengan kapasitas aliran yang relatif lebih rendah dibanding aksial.
 - Contoh: Pompa sentrifugal satu tingkat, kompresor sentrifugal untuk pendinginan, turbin Francis (hidro).
 - Aplikasi di Indonesia: Pompa sirkulasi air pendingin di PLTU, kompresor sentrifugal pada sistem refrigerasi pabrik es, pompa irigasi.
- 2) Aliran Aksial: Fluida masuk dan keluar secara paralel terhadap sumbu rotasi. Karakteristiknya memberikan kapasitas aliran sangat tinggi dengan head/tekanan rendah per tingkat.
 - Contoh: Kipas aksial besar, kompresor aksial pada mesin turbin gas pesawat terbang dan PLTG, pompa aksial untuk drainase.
 - Aplikasi di Indonesia: Kipas pendingin forced draft di menara pendingin PLTU, pompa aksial untuk pengendalian banjir di Jakarta.

Karakteristik Operasional Kunci:

- Kurva Kinerja: Memiliki hubungan karakteristik antara Head (tekanan) vs. Flow yang unik. Head umumnya menurun dengan meningkatnya aliran.
- Kepekaan terhadap Kepadatan Fluida: Kinerja sangat dipengaruhi oleh densitas dan viskositas fluida.
- Potensi Fenomena Instabilitas: Rentan terhadap kavitasi (pada pompa) jika tekanan masuk terlalu rendah, dan surge (pada kompresor) jika aliran terlalu kecil, yang keduanya dapat merusak mesin.

2. Mesin Perpindahan Positif (Positive Displacement)

Prinsip Kerja Dasar:

Mesin perpindahan positif bekerja dengan cara secara mekanis menjebak sejumlah volume fluida yang tetap di ruang tertutup, kemudian memindahkannya dari sisi hisap (tekanan rendah) ke sisi buang (tekanan tinggi). Aliran fluida bersifat intermitten (berdenyut) dan tekanan dihasilkan secara langsung oleh perpindahan volume tersebut melawan hambatan sistem.

Klasifikasi Berdasarkan Gerakan:

- A. **Berputar (*Rotary*):** Elemen pemindah fluida berputar secara kontinu dalam casing, menciptakan ruang yang bergerak.
 - Contoh: Pompa roda gigi (gear pump), pompa lobus (lobe pump), pompa sekrup (screw pump), kompresor sekrup.
 - Aplikasi di Indonesia: Pompa gear untuk pelumas pada mesin besar, pompa lobe untuk transfer bubur kertas (slurry) di pabrik kertas, kompresor sekrup untuk udara instrumen di kilang.

B. **Bolak-Balik (*Reciprocating*)**: Elemen pemindah fluida (torak/piston atau diafragma) bergerak maju-mundur secara linier di dalam silinder.

- Contoh: Pompa piston, pompa plunger, kompresor reciprocating, pompa diafragma.
- Aplikasi di Indonesia: Pompa plunger bertekanan sangat tinggi untuk water jet cutting dan injeksi air di ladang minyak, kompresor reciprocating untuk pengisian tabung gas (O_2 , N_2), pompa dosing diafragma untuk injeksi kimia.

Karakteristik Operasional Kunci:

- Kurva Kinerja: Secara teori, laju aliran konstan dan tidak tergantung pada tekanan discharge (dalam batas kemampuan mekanis). Pada prakteknya, ada sedikit penurunan aliran karena kebocoran internal (slip).
- Self-Priming: Umumnya memiliki kemampuan isap sendiri yang baik.
- Dapat Menangani Fluida Viskos Tinggi: Sangat cocok untuk oli, grease, slurry, dan fluida kental lainnya.
- Getaran dan Pulsasi: Gerakan bolak-balik atau gigi yang bersinggungan menghasilkan getaran mekanis dan pulsa aliran yang memerlukan peredam (pulsation damper) dan fondasi yang kokoh.

Perbandingan Karakteristik dan Area Aplikasi Optimal

Pemilihan antara mesin dinamis dan perpindahan positif didasarkan pada analisis kebutuhan proses. Berikut perbandingan mendalam untuk memandu seleksi.

Tabel 2.2 Perbandingan Mesin Dinamis vs. Mesin Perpindahan Positif

Aspek	Mesin Dinamis (Turbo-machinery)	Mesin Perpindahan Positif (PD)
Prinsip Transfer Energi	Perubahan momentum fluida secara kontinu.	Perpindahan volume fluida secara mekanis dan siklis.
Sifat Aliran	Kontinu dan halus (steady).	Berdenyut/berpulsa (intermittent).
Hubungan Tekanan-Aliran	Tekanan/Head turun saat aliran meningkat (Kurva karakteristik).	Tekanan discharge ditentukan oleh sistem; Aliran relatif konstan terhadap tekanan.
Efisiensi	Efisiensi puncak tinggi pada titik desain, tetapi turun cepat di luar titik tersebut.	Efisiensi volumetrik dan mekanis tinggi pada rentang tekanan yang luas.
Respons terhadap Perubahan Viskositas	Sangat sensitif. Kinerja turun drastis dengan naiknya viskositas.	Toleran. Dapat menangani viskositas sangat tinggi dengan sedikit penurunan kinerja.

Kemampuan Tekanan	Tekanan per tingkat terbatas (terutama aksial). Tekanan tinggi memerlukan banyak tingkat.	Mampu menghasilkan tekanan sangat tinggi dalam satu tingkat.
Rasio Kapasitas-Tekanan	Cocok untuk kapasitas tinggi, tekanan rendah-sedang .	Cocok untuk kapasitas rendah-sedang, tekanan rendah-sangat tinggi .
Konstruksi & Biaya Awal	Relatif sederhana untuk kapasitas besar, biaya per unit flow rendah.	Lebih kompleks, presisi tinggi, biaya per unit flow lebih tinggi.
Perawatan	Umumnya lebih rendah, bagian yang bergerak sedikit.	Lebih tinggi karena lebih banyak bagian bergerak dan kontak.

(Sumber: Sintesis dari Karassik et al., 2008; Bloch, 2006; dan standar industri)

Panduan Pemilihan Aplikasi Optimal:

- Pilih Mesin Dinamis (Turbo) jika: Menangani air, udara, atau gas bersih dengan aliran besar dan tekanan rendah hingga menengah. Contoh: Sistem air pendingin pabrik, sirkulasi boiler, ventilasi gedung, kompresor udara plant.
- Pilih Mesin Perpindahan Positif (PD) jika: Menangani fluida sangat kental (oli, madu, lumpur), membutuhkan tekanan sangat tinggi, atau aliran sangat kecil dan terkontrol. Contoh: Pompa pelumas turbin, pompa metering bahan kimia, kompresor gas bertekanan tinggi, pompa pasta dan slurry.

Studi Kasus Pemilihan di Industri Indonesia: Pompa untuk Transfer Crude Palm Oil (CPO)

CPO pada suhu pemrosesan memiliki viskositas yang relatif tinggi.

- Opsi A - Pompa Sentrifugal (Dinamis): Akan membutuhkan motor yang sangat besar karena penurunan head yang drastis akibat viskositas. Efisiensi rendah dan berisiko tidak mencapai tekanan yang dibutuhkan jika suhu turun (viskositas naik). Tidak optimal.
- Opsi B - Pompa Rotor Lobe (Perpindahan Positif): Aliran relatif konstan meskipun viskositas berubah. Dapat menghasilkan tekanan yang cukup untuk mendorong CPO melalui pipa jarak jauh. Lebih toleran terhadap kotoran kecil. Pilihan yang lebih tepat.

Kasus ini menunjukkan mengapa pabrik kelapa sawit di Riau atau Sumatera Utara banyak menggunakan pompa positive displacement seperti pompa rotor lobe atau screw untuk transfer CPO dan kernel.

Rangkuman dan Implikasi Teknis

Memahami klasifikasi berdasarkan prinsip kerja memungkinkan insinyur dan teknisi untuk:

1. Membuat Seleksi Awal yang Tepat: Menghindari kesalahan dasar seperti menggunakan pompa sentrifugal untuk oli berat.

2. Mengantisipasi Masalah Operasional: Misalnya, mempersiapkan sistem peredam pulsa untuk pompa reciprocating atau menjaga NPSH yang cukup untuk pompa sentrifugal.
3. Merencanakan Strategi Pemeliharaan yang Spesifik: Pemeliharaan mesin PD lebih fokus pada keausan clearance internal dan katup, sementara mesin dinamis lebih fokus pada keseimbangan rotor, kondisi impeler, dan kondisi aliran.
4. Melakukan Troubleshooting yang Terarah: Getaran pada 1X RPM lebih mungkin disebabkan unbalance (dinamis) atau masalah mekanis kopling, sementara getaran pada frekuensi tinggi mungkin disebabkan gear mesh (pada gear pump) atau bantalan.

Prinsip kerja adalah "DNA" dari sebuah mesin berputar. Pemahaman ini, yang dikombinasikan dengan klasifikasi fungsional sebelumnya, membentuk fondasi kuat untuk menguasai materi mesin berputar yang lebih aplikatif.

2.3 Klasifikasi Berdasarkan Parameter Desain dan Operasi

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bagian ini, mahasiswa mampu mengklasifikasikan mesin berputar berdasarkan parameter desain dan operasinya (kecepatan putar, tekanan kerja, kapasitas aliran, dan jumlah tingkat/stage), serta menjelaskan implikasi teknis dari setiap klasifikasi terhadap pemilihan material, desain komponen, strategi operasi, dan program pemeliharaan mesin di industri.

Pendahuluan: Parameter sebagai Bahasa Teknis

Jika klasifikasi berdasarkan fungsi dan prinsip kerja menentukan "peran" dan "cara kerja" sebuah mesin berputar, maka klasifikasi berdasarkan parameter desain dan operasi menentukan "spesifikasi teknis" dan "batas kemampuannya". Parameter-parameter ini adalah bahasa universal yang digunakan dalam data sheet, tender pengadaan, diskusi engineering, dan analisis kinerja. Memahami klasifikasi ini memungkinkan seorang teknisi atau engineer untuk dengan cepat menilai kesesuaian sebuah mesin untuk aplikasi tertentu, mengantisipasi tantangan operasional, dan menentukan pendekatan pemeliharaan yang tepat (Bloch & Geitner, 2012). Misalnya, sebuah pompa yang diklasifikasikan sebagai "high-speed, high-pressure, multi-stage" akan memerlukan material, toleransi, dan protokol perawatan yang jauh berbeda dengan pompa "low-speed, low-pressure, single-stage".

1. Klasifikasi Berdasarkan Kecepatan Putar (Rotational Speed)

Kecepatan putar, biasanya dalam satuan RPM (Revolutions Per Minute), adalah parameter dinamis paling mendasar yang secara langsung mempengaruhi gaya sentrifugal, tegangan material, dan fenomena rotordinamik.

Kategorisasi dan Implikasinya:

- Kecepatan Rendah (< 1.000 RPM): Mesin dengan torsi tinggi dan kecepatan rendah. Contoh: mixer besar, kiln, beberapa jenis kompresor reciprocating. Implikasi: Beban bantalan besar, lebih toleran terhadap ketidakseimbangan statis, namun rentan terhadap torsi pulsasi.

- Kecepatan Sedang (1.000 - 10.000 RPM): Kisaran paling umum untuk banyak peralatan industri. Contoh: Pompa sentrifugal standar (1.500 - 3.600 RPM), motor listrik induksi, fan. Implikasi: Desain rotor biasanya kaku (rigid), balancing sesuai ISO G6.3, dan sistem pelumasan relatif standar.
- Kecepatan Tinggi (10.000 - 50.000 RPM): Memerlukan desain khusus. Contoh: Kompresor sentrifugal untuk aplikasi tertentu, turbin ekspansi, mesin spindel. Implikasi: Rotor seringkali fleksibel (flexible), memerlukan balancing presisi tinggi (ISO G2.5 atau lebih baik), sistem bantalan luncur (journal bearing) atau bantalan khusus (magnetic, air foil), dan material yang memiliki kekuatan fatigue tinggi.
- Kecepatan Sangat Tinggi (> 50.000 RPM): Daerah khusus untuk aplikasi seperti turbocharger, mesin dental drill, atau peralatan laboratorium sentrifugal. Implikasi: Desain sangat kritis terhadap resonansi, pendinginan rotor menjadi tantangan, dan sering menggunakan bantalan gas atau magnetik (Vance, Zeidan, & Murphy, 2010).

Poin Kritis: Kecepatan operasi harus dirancang agar tidak bertepatan dengan kecepatan kritis (critical speed) sistem rotor-bantalan. Semakin tinggi kecepatan, semakin ketat persyaratan keseimbangan dan kesejajaran.

2. Klasifikasi Berdasarkan Tekanan Kerja (Working Pressure)

Tekanan kerja menentukan kekuatan struktural yang harus dimiliki casing, ketebalan dinding poros, dan jenis seal yang digunakan.

Kategorisasi dan Contoh Aplikasi:

- Vakum (Sub-Atmosfer): Tekanan di bawah 1 atm absolut. Contoh: Pompa vakum rotary, blower untuk sistem pengangkutan pneumatik. Tantangan: Mencegah kebocoran udara ke dalam sistem, desain seal khusus.
- Tekanan Rendah (Sampai ~10 bar): Aplikasi umum untuk transfer cairan dan sirkulasi. Contoh: Pompa air pendingin, kipas ventilasi, blower udara. Casing biasanya dari cast iron atau baja karbon.
- Tekanan Menengah (~10 - 100 bar): Umum pada proses industri. Contoh: Pompa proses di kilang, kompresor udara industri, pompa hidrolik. Casing sering dari baja tuang atau baja tempa, menggunakan mechanical seal yang dirating untuk tekanan tersebut.
- Tekanan Tinggi (> 100 bar): Memerlukan desain khusus. Contoh: Pompa plunger untuk waterjet cutting (hingga 4.000 bar), kompresor reciprocating untuk LNG, pompa boiler feed. Implikasi: Casing tipe barrel (vertically split), material high-yield strength steel, sistem seal multi-stage, dan pertimbangan fatigue yang sangat ketat (API 617, 2014). Sambungan flange dan baut harus dirancang untuk menahan tekanan tinggi.

3. Klasifikasi Berdasarkan Kapasitas/Aliran (Capacity/Flow Rate)

Kapasitas, biasanya dalam m³/jam (liquid) atau m³/menit (gas), menentukan ukuran fisik mesin, diameter saluran, dan pemilihan driver.

Kategorisasi (untuk Pompa Sentrifugal sebagai Contoh):

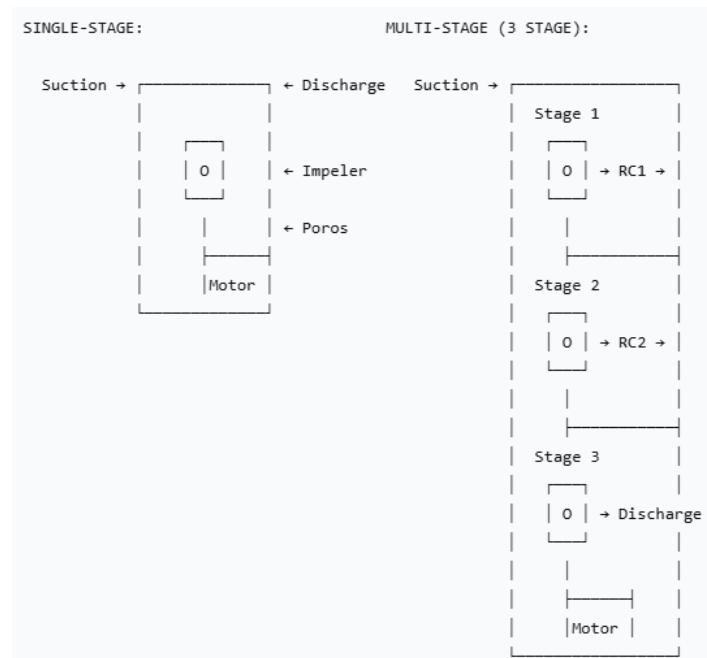
- Kapasitas Kecil ($< 20 \text{ m}^3/\text{jam}$): Sering menggunakan pompa perpindahan positif atau pompa sentrifugal kecil. Efisiensi mungkin lebih rendah, tetapi kontrol aliran lebih baik.
- Kapasitas Menengah ($20 - 500 \text{ m}^3/\text{jam}$): Domain utama pompa sentrifugal dan fan. Banyak pilihan desain standar dari berbagai manufacturer.
- Kapasitas Besar ($> 500 \text{ m}^3/\text{jam}$): Pompa dan fan berukuran besar. Contoh: Pompa air baku untuk kota, pompa sirkulasi kondensor di PLTU, kipas induced draft besar. Implikasi: Dimensi impeler besar, fondasi yang masif, motor berdaya tinggi, dan pertimbangan start-up (arus starting yang besar).

Konsep Penting: Specific Speed (N_s). Ini adalah parameter tak berdimensi yang menghubungkan kecepatan, kapasitas, dan head pompa. Specific Speed digunakan untuk menentukan tipe impeler yang optimal: radial (low N_s) untuk head tinggi-aliran rendah, mixed flow (medium N_s), dan axial (high N_s) untuk head rendah-aliran tinggi (Karassik et al., 2008).

4. Klasifikasi Berdasarkan Jumlah Tingkat (Single-Stage vs Multi-Stage)

Jumlah tingkat (stage) mengacu pada berapa kali energi ditambahkan ke (atau diambil dari) fluida dalam satu mesin.

- **Single-Stage:** Memiliki satu impeler (pompa/kompresor) atau satu set nozzle/bucket (turbin).
 - Keunggulan: Desain sederhana, biaya lebih rendah, perawatan lebih mudah.
 - Keterbatasan: Kemampuan head/tekanan terbatas.
 - Aplikasi: Pompa air umum, fan sentrifugal, turbin impuls sederhana.
- **Multi-Stage:** Memiliki dua atau lebih impeler/rotor yang dipasang pada poros yang sama, ditempatkan secara seri di dalam casing yang sama.
 - Keunggulan: Dapat menghasilkan head/tekanan yang sangat tinggi dengan efisiensi baik pada setiap tingkat. Setiap stage beroperasi pada kecepatan perifer yang optimal.
 - Keterbatasan: Desain kompleks, casing panjang, banyak bagian internal (diffuser, return channel), lebih sensitif terhadap perubahan kondisi operasi (seperti surge pada kompresor), dan biaya lebih tinggi.
 - Aplikasi: Pompa boiler feed di pembangkit listrik, kompresor udara bertekanan tinggi, turbin uap multi-stage (seperti di PLTU), pompa submersible deep well (API 610, 2021).



Gambar 2.2 Perbandingan pompa sentrifugal single-stage dan multi-stage

Deskripsi Gambar 3.5: Diagram skematis perbandingan pompa sentrifugal single-stage dan multi-stage (horisontal). (A) Single-Stage: Menunjukkan satu impeler pada poros, dengan saluran hisap dan buang di sisi yang sama (end suction) atau berlawanan. (B) Multi-Stage (Split Case): Menunjukkan poros dengan tiga impeler. Panah menunjukkan aliran fluida: masuk di stage pertama, melalui saluran internal (*Return Channel* - RC) ke stage kedua, dan seterusnya, lalu keluar di stage terakhir. Label menunjukkan: Impeler, Diffuser/Volute, Return Channel, dan Casing.

Rangkuman dan Implikasi dalam Seleksi dan Operasi

Tabel 2.3 Implikasi Klasifikasi Parameter pada Praktik Engineering

Parameter Klasifikasi	Implikasi pada Desain & Material	Implikasi pada Operasi & Pemeliharaan
Kecepatan Tinggi/ Sangat Tinggi	Bantalan khusus (journal, magnetic), balancing presisi, material high-strength.	Monitoring getaran dan suhu bantalan sangat kritis. Prosedur start-up/shutdown ketat untuk melewati critical speed.
Tekanan Tinggi	Casing barrel, flange berat, baut high-tensile, shaft diameter besar.	Inspeksi rutin untuk fatigue crack, integrity test periodik, seal maintenance intensif.
Kapasitas Besar	Ukuran fisik besar, impeler besar, motor high-power.	Pertimbangan beban listrik saat start-up. Fondasi harus stabil untuk menghindari getaran.

Multi-Stage	Desain internal kompleks, banyak bagian, clearance ketat antar stage.	Perawatan lebih rumit (bongkar-pasang kompleks). Sensitif terhadap kondisi off-design (surge, kavitasi).
--------------------	---	--

Contoh Integrasi Klasifikasi dalam Spesifikasi:

Sebuah "Pompa Sentrifugal Multi-Stage, Horizontal Split Case, Tekanan Tinggi, Kapasitas Menengah" (seperti yang banyak digunakan untuk injeksi air di ladang minyak) langsung memberikan gambaran tentang:

1. Kompleksitas: Tinggi (multi-stage, split case).
2. Material: Kuat (tekanan tinggi).
3. Perawatan: Dapat diakses (horizontal split) tetapi memerlukan keahlian khusus.
4. Aplikasi: Mungkin untuk boosting tekanan air dalam sistem perpipaan panjang.

Pemahaman terhadap klasifikasi parameter ini memungkinkan tim engineering untuk membaca data sheet dengan kritis, berkomunikasi dengan vendor secara efektif, dan membuat keputusan yang tepat dalam siklus hidup aset mesin berputar.

2.4 Klasifikasi Berdasarkan Kritisitas dan Standar

Pendahuluan: Mengapa Kritisitas Penting?

Dalam pengelolaan aset di industri, tidak semua mesin berputar diperlakukan sama. Kritisitas adalah ukuran seberapa besar dampak kegagalan suatu mesin terhadap kelangsungan operasi, keselamatan, lingkungan, dan keuangan perusahaan. Klasifikasi ini menentukan alokasi sumber daya, ketelitian desain, dan intensitas pemeliharaan. Sebuah pompa air pendingin di gedung perkantoran dan sebuah pompa charge di kilang minyak mungkin memiliki prinsip kerja yang sama, namun pendekatan engineering terhadap keduanya berbeda secara radikal karena perbedaan kritisitas (Bloch & Geitner, 2012). Pemahaman ini adalah fondasi dari Risk-Based Asset Management.

1. Mesin Umum vs Mesin Proses Kritis: Perbedaan Filosofi

Mesin Umum (General Purpose/Commercial):

Mesin ini dirancang untuk aplikasi standar, di mana kegagalan tidak menyebabkan gangguan signifikan pada proses produksi utama, keselamatan, atau lingkungan.

- Ciri: Desain terstandarisasi, tersedia "off-the-shelf", harga kompetitif.
- Contoh di Indonesia: Pompa sirkulasi air untuk HVAC di mal atau perkantoran, kipas ventilasi di pabrik garmen, motor listrik untuk konveyor di gudang.
- Standar yang Berlaku: Standar industri umum seperti ISO 5199 untuk pompa sentrifugal atau IEC 60034 untuk motor listrik. Standar ini relatif lebih fleksibel dan berfokus pada kinerja dasar dan keselamatan umum.

Mesin Proses Kritis (Critical/API/Process Machinery):

Mesin yang keagalannya dapat menyebabkan:

- 1) Shutdown Total Pabrik dengan kerugian finansial besar (bisa mencapai miliaran rupiah per hari).

- 2) Insiden Keselamatan Berat seperti kebakaran, ledakan, atau paparan bahan berbahaya.
 - 3) Dampak Lingkungan Serius seperti tumpahan minyak atau gas beracun.
 - 4) Kerusakan Aset Berantai yang meluas.
- Ciri: Dirancang khusus (custom-engineered), masa pengiriman panjang, harga tinggi.
 - Contoh di Indonesia: Kompresor sentrifugal untuk proses di Kilang Pertamina Balongan, Pompa Boiler Feed di PLTU Paiton, Turbin Gas di PLTGU Muara Karang.
 - Standar yang Berlaku: Standar khusus industri yang sangat ketat, terutama dari American Petroleum Institute (API) dan International Organization for Standardization (ISO). Contoh:
 - API 610: Pompa Sentrifugal untuk Industri Minyak, Gas, dan Petrokimia.
 - API 617: Kompresor Sentrifugal dan Aksial.
 - API 618: Kompresor Reciprocating.
 - ISO 10440: Kompresor Rotary Positive Displacement.
- Standar ini mencakup persyaratan detail untuk material, desain, fabrikasi, pengujian, dan pemasangan (API 610, 2021; API 617, 2014).

2. Dampak Kegagalan terhadap Operasi Pabrik

Dampak kegagalan harus dianalisis dari perspektif Risiko = Probabilitas × Konsekuensi.

Tabel 2.4. Analisis Dampak Kegagalan Berdasarkan Kritisitas

Dampak	Mesin Umum	Mesin Proses Kritis
Produksi	Gangguan lokal, dapat diganti dengan <i>standby unit</i> atau diperbaiki cepat.	Shutdown total atau parsial pabrik. Kehilangan produksi masif. Contoh: Kegagalan <i>Recycle Gas Compressor</i> di kilang dapat menghentikan 70% operasi.
Keamanan & Lingkungan	Risiko rendah, biasanya terbatas pada area mesin.	Potensi katastrofik. Kebocoran hidrokarbon, pelepasan gas beracun (H ₂ S), atau kebakaran. Insiden seperti di fasilitas industri kerap berawal dari kegagalan komponen kritis.
Biaya Langsung	Biaya perbaikan/replacement terbatas pada harga mesin dan tenaga kerja.	Biaya perbaikan sangat tinggi (suku cadang khusus, tenaga ahli ekspatriat, sewa alat berat).
Biaya Tidak Langsung	Relatif kecil, mungkin hanya gangguan operasional minor.	Sangat Besar (dominan). Termasuk kehilangan produksi, penalti keterlambatan pengiriman, biaya

		start-up ulang, dan kerusakan reputasi.
Waktu Perbaikan	Jam atau hari.	Minggu hingga bulan, tergantung ketersediaan suku cadang dan kompleksitas perbaikan.

(Sumber: Disarikan dari analisis risiko aset pada laporan tahunan industri dan studi kasus Bloch, 2009)

3. Implikasi pada Desain, Material, dan Program Pemeliharaan

Klasifikasi kritisitas menentukan seluruh siklus hidup aset, dari awal hingga akhir siklus hidup sebuah aset (*cradle to grave*).

1) Implikasi pada Desain dan Engineering:

- Mesin Umum: Perhitungan desain berdasarkan buku panduan pabrikan. Analisis seperti Finite Element Analysis (FEA) untuk stress atau analisis rotordynamics seringkali tidak dilakukan atau disederhanakan.
- Mesin Kritis (API/ISO): Wajib melakukan analisis engineering mendalam:
 - Rotordynamic Analysis: Menghitung critical speeds, response terhadap unbalance, dan stabilitas rotor (sesuai API 617 Annex D).
 - Stress Analysis: FEA pada casing, poros, dan komponen kritis.
 - Mechanical Analysis: Perhitungan kekuatan flange, baut, dan sambungan.
 - Penyediaan Dokumentasi Lengkap: Data book, calculation report, dan as-built drawing yang detail wajib diserahkan.

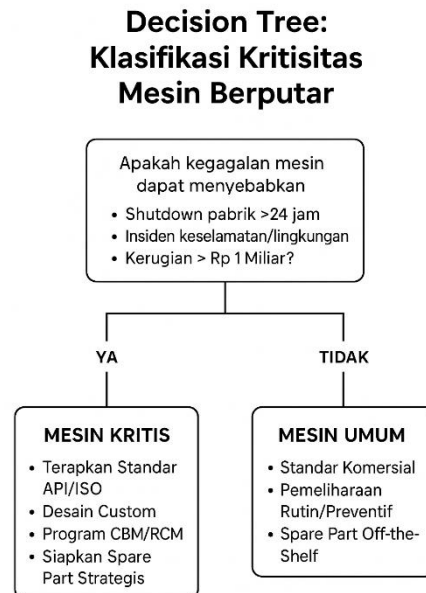
2) Implikasi pada Pemilihan Material dan Fabrikasi:

- Mesin Umum: Material standar seperti cast iron, baja karbon, bronze. Proses fabrikasi standar, inspeksi visual sederhana.
- Mesin Kritis (API/ISO): Material harus memenuhi spesifikasi ketat (misal, ASTM A216 Gr. WCB untuk casing). Sertifikat material (Material Test Certificate - MTC) wajib ada dan traceable. Proses fabrikasi diawasi dengan Quality Control/Quality Assurance (QC/QA) ketat, termasuk Non-Destructive Testing (NDT) seperti Ultrasonic Testing (UT) dan Radiographic Testing (RT) pada sambungan las.

3) Implikasi pada Program Pemeliharaan dan Monitoring:

- Mesin Umum: Pemeliharaan sering bersifat korektif (tunggu rusak) atau preventif berbasis waktu (ganti part setiap 6 bulan). Monitoring sederhana (dengar suara, raba suhu).
- Mesin Kritis: Diperlukan pendekatan proaktif dan prediktif:
 - Condition-Based Maintenance (CBM): Menggunakan sistem online monitoring untuk getaran, suhu bantalan, performa termal, dan analisis pelumas (oil analysis).
 - Reliability-Centered Maintenance (RCM): Strategi pemeliharaan didasarkan pada analisis mode kegagalan dan risikonya.

- Spare Parts Management: Menyimpan spare parts kritis yang mahal (seperti rotor lengkap) untuk meminimalkan downtime, meski mengikat modal besar.
- Tim Khusus: Dikelola oleh tim Machinery Engineer atau Reliability Engineer yang berpengalaman.



Gambar 2.3 Decision Tree: Klasifikasi Kritisitas Mesin Berputar

- Diagram dimulai dengan pertanyaan "Apakah kegagalan mesin dapat menyebabkan: (1) Shutdown pabrik > 24 jam, (2) Insiden keselamatan/lingkungan, atau (3) Kerugian > Rp 1 Miliar?"
- Jika YA, arahkan ke kotak "MESIN KRITIS" dengan tindakan: "Terapkan Standar API/ISO, Desain Custom, Program CBM/RCM, Siapkan Spare Part Strategis".
- Jika TIDAK, arahkan ke kotak "MESIN UMUM" dengan tindakan: "Standar Komersial, Pemeliharaan Rutin/Preventif, Spare Part Off-the-Shelf".

Rangkuman dan Aplikasi

Sebagai calon teknisi atau supervisor, kemampuan membedakan kritisitas mesin adalah keterampilan praktis yang vital:

1. Prioritas Kerja: Pahami bahwa pengerjaan di mesin kritis memerlukan prosedur izin kerja (work permit), metode, dan pengawasan yang lebih ketat.
2. Pelaporan yang Tepat: Melaporkan kelainan pada mesin kritis harus dilakukan segera, sementara pada mesin umum mungkin bisa ditunda hingga jadwal perawatan rutin.
3. Memahami Budaya Kerja: Di area proses kritis, sikap zero tolerance terhadap pelanggaran prosedur adalah hal yang mutlak.

Di industri Indonesia yang terus berkembang, penerapan standar tinggi untuk mesin kritis bukan lagi pilihan, tetapi keharusan untuk mencapai operasi yang aman, andal, dan berkelanjutan. Pemahaman klasifikasi ini menjadi jembatan antara teori di bangku kuliah dan tuntutan nyata di lapangan.

LATIHAN/TUGAS

Petunjuk Umum

1. Bacalah setiap studi kasus dengan cermat.
2. Jawablah pertanyaan secara analitis dan sistematis, dengan mengaitkan konsep klasifikasi mesin berputar.
3. Gunakan istilah teknis yang tepat sebagaimana digunakan di industri.
4. Jawaban ditulis ringkas namun argumentatif ($\pm$ 1–2 halaman per kasus untuk tugas kelompok).

Studi Kasus 1 – Analisis Fungsi Mesin dalam Sistem

Kasus:

Sebuah unit sistem pendingin heat exchanger di pabrik pupuk menggunakan motor listrik 200 kW untuk menggerakkan pompa sentrifugal melalui kopling fleksibel dan gearbox reduksi. Sistem ini beroperasi kontinu 24 jam. Ketika motor listrik mengalami gangguan, seluruh unit proses harus dihentikan untuk mencegah overheating.

Tugas Mahasiswa:

1. Klasifikasikan setiap mesin berputar dalam sistem tersebut berdasarkan fungsi dalam sistem.
2. Jelaskan peran masing-masing mesin terhadap keberlangsungan operasi proses.
3. Analisis dampak kegagalan salah satu mesin terhadap sistem secara keseluruhan.

Studi Kasus 2 – Pemilihan Prinsip Kerja Mesin

Kasus:

Sebuah pabrik kelapa sawit (PKS) di Sumatera harus mentransfer Crude Palm Oil (CPO) dari tangki penyimpanan ke unit pemurnian. Fluida bersifat kental dan viskositasnya berubah mengikuti temperatur. Manajemen mempertimbangkan dua opsi:

- Pompa sentrifugal
- Pompa screw (positive displacement)

Tugas Mahasiswa:

1. Bandingkan kedua opsi pompa berdasarkan prinsip kerja mesin berputar.
2. Tentukan pompa yang paling sesuai dan jelaskan alasan teknisnya.
3. Jelaskan potensi masalah operasional jika opsi yang kurang tepat dipilih.

Studi Kasus 3 – Kecepatan Putar dan Implikasi Pemeliharaan

Kasus:

Sebuah kompresor sentrifugal berkecepatan tinggi (18.000 RPM) digunakan pada unit proses gas. Mesin sering menunjukkan peningkatan getaran saat start-up dan shutdown, meskipun telah dilakukan pelumasan rutin.

Tugas Mahasiswa:

1. Klasifikasikan mesin tersebut berdasarkan kecepatan putar.
2. Jelaskan mengapa mesin berkecepatan tinggi lebih sensitif terhadap masalah getaran.
3. Rekomendasikan strategi operasi dan pemeliharaan yang tepat untuk mengurangi risiko kegagalan.

Studi Kasus 4 – Single-Stage vs Multi-Stage

Kasus:

Pada sebuah PLTU, pompa boiler feed water harus menaikkan tekanan air hingga lebih dari 150 bar sebelum masuk ke boiler. Awalnya dipertimbangkan pompa sentrifugal single-stage, namun kemudian dipilih pompa multi-stage.

Tugas Mahasiswa:

1. Jelaskan alasan teknis penggunaan pompa multi-stage pada aplikasi ini.
2. Bandingkan kelebihan dan keterbatasan pompa single-stage dan multi-stage dari sisi desain dan pemeliharaan.
3. Jelaskan risiko operasional jika pompa single-stage tetap digunakan.

Studi Kasus 5 – Kritisitas Mesin dan Standar Industri

Kasus:

Sebuah pompa proses di kilang minyak berfungsi sebagai pompa charge utama. Kegagalannya dapat menghentikan 70% operasi kilang dan berpotensi menimbulkan kebocoran hidrokarbon. Pompa tersebut dirancang mengikuti standar API 610 dan dilengkapi sistem monitoring getaran online.

Tugas Mahasiswa:

1. Tentukan tingkat kritisitas mesin tersebut dan jelaskan alasannya.
2. Jelaskan mengapa mesin kritis harus mengikuti standar API/ISO, bukan standar komersial umum.
3. Uraikan perbedaan pendekatan pemeliharaan antara mesin ini dan mesin non-kritis.

DAFTAR PUSTAKA

1. API 617. (2014). *Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressors*. American Petroleum Institute.
2. ASME. (2021). Pump Testing Standard: ASME PTC 8.2-2021. The American Society of Mechanical Engineers.
3. Bently, D. E., & Hatch, C. T. (2003). *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics*. Bently Pressurized Bearing Press.
4. Bloch, H. P. (2006). *A Practical Guide to Compressor Technology* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
5. Bloch, H. P., & Geitner, F. K. (2012). *Major Process Equipment Maintenance and Repair* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
6. Bureau of Energy Efficiency. (2004). *Energy Efficiency in Electrical Utilities*. Chapter 4: Compressed Air System. Kementerian Tenaga, India. [Tersedia online di portal BEE]
7. ISO 5389:2005. *Turbocompressors — Performance test code*. International Organization for Standardization.
8. Lakshminarayana, B. (1996). *Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery*. John Wiley & Sons.
9. Sayers, A. T. (1990). *Hydraulic and Compressible Flow Turbomachines*. McGraw-Hill.

Modul 3

Parameter Operasi dan Monitoring Utama

Capaian Pembelajaran:

Setelah menyelesaikan Modul 3 ini, mahasiswa mampu menerapkan, menganalisis, dan mengevaluasi secara terbatas parameter operasi dan sistem monitoring pada mesin berputar untuk mendukung kegiatan operasi dan pemeliharaan berbasis kondisi di lingkungan industri.

3.1 Parameter Proses Utama

Pendahuluan: Parameter sebagai Indikator Kesehatan Proses

Dalam operasi mesin berputar, parameter proses bukan sekadar angka yang dibaca dari alat ukur. Mereka merupakan indikator vital yang memberikan informasi real-time tentang kondisi mesin dan sistem yang dilayaninya. Pemantauan parameter proses yang efektif memungkinkan operator dan teknisi untuk mendeteksi penyimpangan dari kondisi normal, mengoptimalkan kinerja, dan mencegah kegagalan yang dapat menyebabkan downtime. Pemahaman ini adalah dasar dari Proses Monitoring dan Condition-Based Maintenance (Bloch & Geitner, 2012). Setiap parameter memiliki kisaran operasi normal (*normal operating range*) yang ditentukan oleh desain mesin dan kondisi proses.

1. Tekanan (Pressure)

Tekanan adalah gaya per satuan luas yang diberikan oleh fluida, dan merupakan parameter energi utama dalam sistem fluida. Pemantauan tekanan dilakukan pada beberapa titik kritis.

- Tekanan Hisap (Suction Pressure): Tekanan pada sisi masuk mesin. Pada pompa, tekanan hisap yang terlalu rendah dapat menyebabkan kavitasi, yaitu terbentuknya gelembung uap yang kemudian akan kolaps dan merusak impeler dan casing. Net Positive Suction Head Available (NPSHA) harus selalu lebih besar dari NPSH Required (NPSHR) yang ditentukan pabrik (HI 9.6.2, 2012). Pada kompresor, tekanan hisap yang rendah dapat menyebabkan penurunan kapasitas dan potensi surge.
- Tekanan Keluar (Discharge Pressure): Tekanan pada sisi keluar mesin. Tekanan ini harus memadai untuk mengatasi hambatan sistem (system resistance) dan mengantarkan fluida ke tujuan. Tekanan keluar yang berlebihan dapat menunjukkan tersumbatnya sistem di hilir atau pengaturan yang salah, dan membebani komponen mesin secara berlebihan.
- Tekanan Diferensial (Differential Pressure atau ΔP): Selisih antara tekanan keluar dan tekanan hisap. Pada pompa, ΔP berkorelasi langsung dengan Head yang dihasilkan ($\text{Head} \approx \Delta P / (\rho \times g)$). Pada filter, strainer, atau heat exchanger, kenaikan ΔP yang tidak normal dapat mengindikasikan penyumbatan atau fouling.

Contoh Penerapan: Di sebuah pompa sentrifugal pada sistem pendingin, tekanan hisap dijaga di atas 2 bar absolut untuk mencegah kavitasi, sementara tekanan keluar dipertahankan pada 8 bar untuk memastikan aliran yang cukup melalui heat exchanger.

2. Aliran (*Flow*)

Aliran mengukur jumlah fluida yang dipindahkan per satuan waktu dan merupakan parameter kapasitas utama.

- **Laju Aliran (*Flow Rate*):** Diukur dalam satuan seperti m^3/jam (cairan) atau m^3/menit (gas). Laju aliran aktual dibandingkan dengan kurva kinerja mesin (pump/compressor curve) untuk mengevaluasi apakah mesin beroperasi pada atau dekat titik efisiensi terbaik (Best Efficiency Point/BEP). Operasi yang berkepanjangan jauh dari BEP dapat menyebabkan peningkatan getaran, kavitasi (pada aliran tinggi), atau overheating (pada aliran rendah).
- **Kecepatan Aliran (*Velocity*):** Diukur dalam satuan seperti m/detik. Kecepatan aliran yang tidak tepat dalam sistem perpipaan dapat menyebabkan erosi (jika terlalu tinggi) atau sedimentasi (jika terlalu rendah). Standar seperti ASME B31.3 memberikan panduan untuk kecepatan aliran maksimum yang diizinkan berdasarkan jenis fluida dan material pipa.

Contoh Penerapan: Pada kompresor sentrifugal di pabrik amonia, laju aliran gas proses dipantau ketat. Penurunan aliran mendekati surge limit akan memicu sistem kontrol untuk membuka anti-surge valve secara otomatis, mencegah kondisi surge yang merusak.

3. Temperatur (*Temperature*)

Temperatur adalah ukuran energi panas dalam sistem. Pengukuran dilakukan pada berbagai titik untuk memantau kondisi termal mesin dan fluida.

- **Temperatur Fluida (Hisap dan Keluar):** Perubahan temperatur fluida dapat mengindikasikan masalah proses atau kinerja mesin. Pada kompresor, kenaikan temperatur keluar yang tidak normal (discharge temperature) dapat mengindikasikan efisiensi internal yang turun, kebocoran intercooler, atau kondisi surge. Pada pompa, temperatur cairan yang lebih tinggi dari desain dapat menurunkan viskositas dan NPSH yang tersedia, serta memengaruhi material seal.
- **Temperatur Bantalan:** Parameter kritis untuk kesehatan bantalan. Kenaikan suhu bantalan seringkali merupakan gejala awal dari kegagalan pelumasan, beban berlebih, misalignment, atau kerusakan bantalan itu sendiri. Banyak mesin dilengkapi dengan sensor suhu (RTD atau thermocouple) dan alarm high temperature.
- **Temperatur Casing:** Pemantauan suhu casing dapat mendeteksi masalah seperti gesekan internal, kebocoran fluida panas, atau kegagalan isolasi termal. Perbedaan suhu antara dua sisi casing juga dapat mengindikasikan masalah aliran atau fouling.

Contoh Penerapan: Di turbin uap, pemantauan temperatur uap masuk, casing, dan bantalan dilakukan secara terus-menerus. Temperatur bantalan yang melebihi 85°C akan memicu alarm, dan jika mencapai 95°C , turbin akan trip secara otomatis untuk mencegah kerusakan katastrofik.

4. Level dan Kondisi Fluida

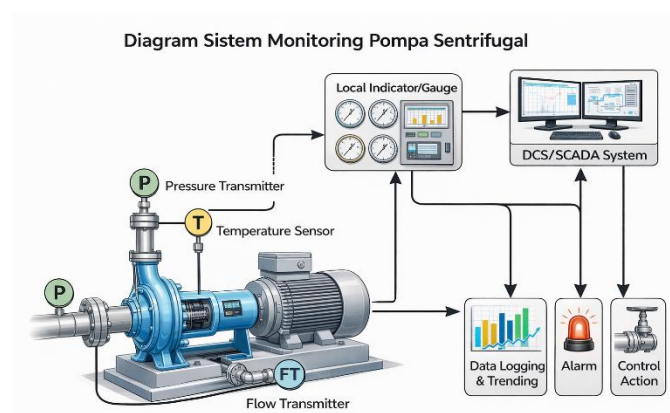
Parameter ini berkaitan dengan keadaan dan kualitas fluida yang diproses.

- **Level:** Pada sistem yang memiliki tangki atau vessel, pemantauan level cairan sangat penting untuk memastikan ketersediaan pasokan yang memadai untuk mesin (misalnya, level pada suction tank pompa) dan mencegah kondisi run-dry yang dapat merusak seal dan bantalan. Level yang tidak stabil juga dapat menyebabkan fluktuasi tekanan hisap.
- **Kondisi/Kualitas Fluida:** Karakteristik fluida yang menyimpang dari desain dapat sangat memengaruhi kinerja dan keandalan mesin.
 - **Viskositas:** Mempengaruhi kurva kinerja pompa dan kompresor. Peningkatan viskositas akan mengurangi kapasitas dan head, serta meningkatkan daya yang dibutuhkan.
 - **Densitas/Massa Jenis:** Langsung memengaruhi tekanan yang dihasilkan ($\text{Pressure} = \text{Head} \times \rho \times g$) dan beban pada poros.
 - **Komposisi dan Kebersihan:** Keberadaan padatan (solids), gas terlarut (pada cairan), atau kandungan cairan (pada gas) dapat menyebabkan erosi, kavitasi, atau masalah pada seal. Fluida yang korosif memerlukan pemilihan material yang sesuai.

Contoh Penerapan: Pada pompa yang memindahkan slurry batu bara di PLTU, pemantauan konsentrasi padatan (solid concentration) sangat penting. Peningkatan konsentrasi di luar batas akan meningkatkan laju keausan impeler dan casing, serta memerlukan penyesuaian jadwal pemeliharaan.

Integrasi Parameter dan Sistem Monitoring

Pada mesin-mesin modern, parameter-proses ini diukur oleh sensor dan dikirim ke Distributed Control System (DCS) atau Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA). Sistem ini tidak hanya menampilkan nilai (real-time display) tetapi juga mencatat tren historis (historical trending), mengaktifkan alarm saat parameter menyimpang dari setpoint, dan dapat terintegrasi dengan sistem proteksi otomatis. Gambar 3.7 mengilustrasikan suatu sistem monitoring pompa sentrifugal berbasis DCS/SCADA.



Gambar 3.1 Diagram Sistem Monitoring Pompa Sentrifugal

Deskripsi Gambar 3.1: Diagram sistem monitoring pompa sentrifugal. Diagram menunjukkan pompa dengan simbol sensor di titik-titik kunci: (P) untuk Pressure Transmitter

di suction dan discharge, (T) untuk Temperature Sensor di bearing dan casing, (FT) untuk Flow Transmitter di discharge line. Semua sensor terhubung ke kotak "Local Indicator/Gauge" dan juga ke garis menuju "DCS/SCADA System". Dari DCS, ada panah ke "Data Logging & Trending", "Alarm", dan "Control Action".

Rangkuman dan Implikasi Praktis

Pemahaman terhadap parameter proses utama memungkinkan personel operasi dan pemeliharaan untuk:

1. Mengoperasikan mesin dalam batas aman dan efisien.
2. Mendiagnosis masalah secara dini sebelum berkembang menjadi kegagalan besar (misalnya, penurunan tekanan hisap sebagai tanda awal kebocoran atau penyumbatan).
3. Mengumpulkan data untuk analisis kinerja dan perencanaan pemeliharaan prediktif.

Parameter-parameter ini saling terkait. Sebagai contoh, penurunan laju aliran yang disertai peningkatan temperatur discharge pada sebuah kompresor dapat menjadi indikator kuat dari kondisi surge atau fouling internal. Dengan demikian, interpretasi yang holistik terhadap semua parameter proses adalah kunci dari pengelolaan aset mesin berputar yang efektif.

3.2 Parameter Mekanis Utama

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bagian ini, mahasiswa mampu mengidentifikasi, mengukur, dan menginterpretasikan parameter-parameter mekanis utama pada mesin berputar (kecepatan putar, beban, perpindahan, dan getaran) serta memahami hubungannya dengan kondisi kinerja dan keandalan mesin dalam operasi industri.

Pendahuluan

Parameter mekanis memberikan gambaran langsung tentang kondisi fisik dan respons dinamis mesin berputar. Berbeda dengan parameter proses yang berkaitan dengan fluida, parameter mekanis fokus pada perilaku komponen padat (seperti poros, bantalan, dan casing) selama operasi. Pemantauan parameter ini adalah inti dari Condition-Based Maintenance (CBM) dan Predictive Maintenance. Menurut standar ISO 17359, pemantauan kondisi mesin melalui parameter mekanis dapat mengurangi biaya pemeliharaan hingga 30% dan mencegah kegagalan tak terduga (ISO 17359:2018). Parameter mekanis yang menyimpang seringkali merupakan tanda peringatan dini (early warning) sebelum munculnya gejala pada parameter proses.

1. Kecepatan Putar (RPM) dan Variasi

Kecepatan putar merupakan parameter operasi paling dasar yang mempengaruhi semua aspek kinerja dan dinamika mesin.

- **Signifikansi:** Kecepatan putar menentukan kapasitas, head (pada pompa/kompresor), frekuensi eksitasi getaran, dan apakah mesin beroperasi di dekat kecepatan kritisnya. Pada mesin dinamis (turbo-machinery), terdapat hubungan kuadrat antara kecepatan dan head yang dihasilkan.
- **Variasi Kecepatan:** Perubahan kecepatan yang tidak terkendali dapat disebabkan oleh:
 - **Load Variation:** Perubahan beban pada mesin yang digerakkan.

- **Driver Issue:** Masalah pada penggerak (motor, turbin) atau sistem kontrolnya (VFD, governor).
- **Process Requirement:** Perubahan yang disengaja untuk mengatur kapasitas, seperti pada pompa dengan Variable Frequency Drive (VFD).
- **Pengukuran & Monitoring:** Menggunakan sensor seperti Tachometer (kontak/non-kontak), Proximity Probe, atau Encoder. Kecepatan merupakan referensi kunci dalam analisis spektrum getaran, di mana frekuensi getaran sering dinyatakan sebagai kelipatan RPM (misal, 1X, 2X RPM).

2. Beban (Torque, Power)

Beban mengacu pada besarnya gaya atau torsi yang harus ditanggung dan ditransmisikan oleh mesin selama beroperasi.

- **Torsi (Torque):** Ukuran gaya puntir pada poros, dengan satuan Newton-meter (Nm) atau pound-feet (lb-ft). Torsi operasi aktual harus berada dalam kapasitas yang dapat ditanggung oleh poros dan kopling.
 - Torsi Start-up: Seringkali lebih tinggi dari torsi operasi normal, menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan motor dan kopling.
 - Torsi Fluktuasi: Pada mesin reciprocating atau dengan beban impact (seperti crusher), torsi berfluktuasi dapat menyebabkan getaran torsional yang berbahaya.
- **Daya (Power):** Laju kerja yang dilakukan, dalam satuan kilowatt (kW) atau Horsepower (HP). Daya dihitung sebagai: $\text{Daya (kW)} = (\text{Torsi (Nm)} \times \text{RPM}) / 9550$.
 - **Daya Absorpsi vs. Daya Input:** Pada driven machinery seperti pompa, daya yang diserap (brake horsepower - BHP) harus sesuai dengan daya output penggerak, dengan memperhatikan efisiensi.
 - **Monitoring Daya:** Pada motor listrik, daya dapat diperkirakan dari pengukuran arus (menggunakan clamp meter) dengan mengetahui tegangan dan faktor daya. Daya yang berlebihan mengindikasikan overload atau inefisiensi, sementara daya yang terlalu rendah dapat mengindikasikan slip atau operasi off-design.

3. Perpindahan (Radial, Axial)

Perpindahan mengacu pada perubahan posisi fisik poros relatif terhadap bantalan atau rumahnya, yang diukur dalam mikrometer (μm) atau mil.

- **Perpindahan Radial (Radial Displacement):** Pergerakan poros tegak lurus terhadap sumbu panjangnya. Pada bantalan luncur (journal bearing), poros akan mengambang pada film oli. Besarnya perpindahan radial yang diizinkan (clearance) ditentukan oleh desain bantalan. Perpindahan radial berlebih dapat disebabkan oleh:
 - Unbalance (ketidakseimbangan)
 - Misalignment (ketidaksejajaran)
 - Bent Shaft (poros bengkok)
 - Journal Bearing Wear (keausan bantalan luncur)
- **Perpindahan Aksial (Axial Displacement atau Thrust Position):** Pergerakan poros sepanjang sumbunya. Dipantau terutama pada mesin yang menghasilkan gaya aksial

signifikan, seperti pompa sentrifugal multi-stage atau turbin uap. Perpindahan aksial yang berlebihan dapat merusak bantalan aksial (thrust bearing) dan mechanical seal. Pemantauannya sangat kritis untuk mencegah kontak metal-to-metal antara rotor dan stator.

- Pengukuran: Menggunakan sensor Proximity Probe (biasanya eddy-current type) yang dipasang secara radial dan aksial dekat bantalan. Pada mesin kritis, sistem API 670 mewajibkan pemasangan sensor ini sebagai bagian dari sistem proteksi mesin (machinery protection system).

4. Getaran (Velocity, Acceleration, Displacement)

Getaran adalah osilasi mekanis dari komponen mesin dan merupakan parameter monitoring kondisi yang paling umum digunakan. Getaran diukur dalam tiga parameter utama, masing-masing memberikan informasi berbeda:

Tabel 3.1. Parameter Pengukuran Getaran dan Aplikasinya

Parameter	Satuan	Sensitivitas Frekuensi	Aplikasi Utama	Standar Acuan
Perpindahan (Displacement)	mikrometer (μm) puncak-puncak	Rendah (10 - 1000 Hz)	- Monitoring perpindahan poros relatif (<i>relative shaft displacement</i>) pada bantalan luncur. - Mesin kecepatan sangat rendah (< 600 RPM).	API 670, ISO 7919
Kecepatan (Velocity)	milimeter per detik (mm/s) RMS	Menengah (10 - 1000 Hz)	- Monitoring kondisi umum mesin yang paling banyak digunakan. - Berkorelasi baik dengan energi getaran dan tingkat keparahan. - Cocok untuk rentang kecepatan luas (600 - 60,000 RPM).	ISO 10816-1 (Evaluasi getaran pada bagian non-rotating)
Percepatan (Acceleration)	meter per detik ² (m/s^2) atau g's	Tinggi (> 1000 Hz)	- Deteksi dini kerusakan bantalan gelinding (<i>rolling element bearings</i>). - Masalah pada gigi gearbox (<i>gear mesh</i>). - Impact dan frekuensi sangat tinggi.	ISO 13373-2

(Sumber: Adaptasi dari ISO 10816-1:2016 dan panduan Vibration Institute)

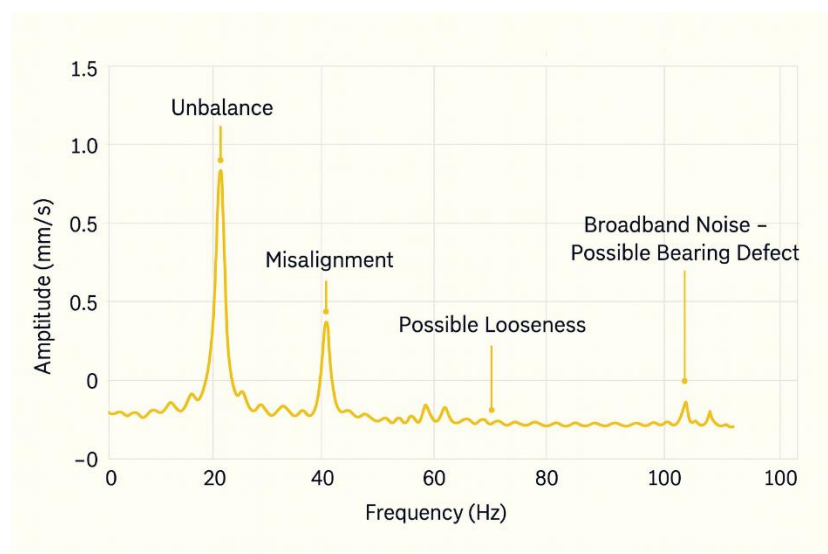
- **Pemilihan Parameter:** Untuk monitoring rutin kesehatan mesin umum, kecepatan getaran (mm/s RMS) adalah parameter pilihan karena memberikan gambaran keseluruhan yang stabil dan tidak terlalu dipengaruhi oleh frekuensi tunggal.

- **Batas Getaran:** Standar ISO 10816-1 memberikan panduan nilai ambang getaran kecepatan untuk berbagai kelas mesin (misal, Kelas II untuk pompa dan motor berukuran medium). Nilai biasanya dikategorikan sebagai: Baik (Good), Memuaskan (Satisfactory), Diizinkan (Allowable), dan Tidak Diizinkan (Unacceptable).

5. Analisis Spektrum Getaran Dasar

Analisis spektrum adalah teknik untuk memecah sinyal getaran kompleks (dalam time domain) menjadi komponen-komponen frekuensi penyusunnya (dalam frequency domain). Teknik ini, biasanya menggunakan Fast Fourier Transform (FFT), adalah alat diagnostik paling kuat untuk mengidentifikasi akar penyebab getaran.

- Prinsip: Setiap masalah mekanis menghasilkan getaran pada frekuensi karakteristik tertentu yang terkait dengan kecepatan putar (RPM) dan geometri komponen.
- Frekuensi Karakteristik dan Penyebab Umum:
 - 1X RPM: Dominan - Ketidakseimbangan (Unbalance). Juga dapat disebabkan oleh Bent Shaft atau Eccentricity.
 - 2X RPM: Dominan - Ketidakejajaran (Misalignment). Juga dapat muncul pada Mechanical Looseness.
 - $N \times \text{RPM}$ (Harmonik): Sering muncul pada Kelonggaran Mekanis (Mechanical Looseness).
 - Frekuensi Tetap (50/60 Hz, 100/120 Hz): Masalah listrik pada motor (misal, Air Gap Eccentricity).
 - Frekuensi Bantalan Gelinding (BPFO, BPFI, BSF, FTF): Kerusakan pada bantalan gelinding (kerusakan outer race, inner race, bola/rol, atau cage). Frekuensi ini dapat dihitung berdasarkan geometri bantalan dan kecepatan.
 - Frekuensi Gigi (Gear Mesh Frequency - GMF): $\text{GMF} = \text{Jumlah gigi} \times \text{RPM}$. Sidebands di sekitar GMF mengindikasikan kerusakan gigi atau eccentricity.



Gambar 3.2 Contoh Spektrum Getaran FFT dari Sebuah Pompa Sentrifugal

Deskripsi Gambar 3.2: Contoh spektrum getaran FFT dari sebuah pompa sentrifugal. Grafik memiliki sumbu horizontal Frekuensi (Hz) dan sumbu vertikal Amplitudo (mm/s). Terlihat beberapa puncak dengan label: (1) Puncak besar pada 1X RPM (25 Hz), diberi label "Unbalance". (2) Puncak lebih kecil pada 2X RPM (50 Hz), diberi label "Misalignment". (3) Serangkaian puncak harmonik (3X, 4X, 5X RPM), diberi label "Possible Looseness". (4) Rentang frekuensi tinggi dengan puncak-puncak acak, diberi label "Broadband Noise - Possible Bearing Defect".

Rangkuman dan Implikasi Pemantauan

Parameter mekanis memberikan "suara" dan "gerakan" dari mesin yang beroperasi. Dengan memantau dan menganalisis parameter ini secara sistematis:

1. Masalah dapat didiagnosis lebih akurat dibandingkan hanya mengandalkan parameter proses. Misalnya, getaran tinggi pada 2X RPM lebih mengarah ke misalignment daripada masalah proses.
2. Intervensi pemeliharaan dapat dijadwalkan secara proaktif sebelum kegagalan terjadi, meminimalkan downtime.
3. Dasar untuk perbaikan yang tepat dapat ditentukan, misalnya, balancing jika 1X RPM tinggi, atau alignment koreksi jika 2X RPM tinggi.

Integrasi antara pemantauan parameter proses dan mekanis menciptakan gambaran holistik tentang kesehatan mesin, yang merupakan esensi dari pengelolaan aset yang modern dan andal.

3.3 Parameter Kondisi dan Kinerja

Pendahuluan

Parameter kondisi dan kinerja memberikan informasi kuantitatif tentang seberapa baik sebuah mesin berputar menjalankan fungsinya dan seberapa dekat ia beroperasi dengan batas-batas desainnya. Tidak seperti parameter proses dan mekanis yang menggambarkan "apa yang terjadi", parameter kinerja menjawab "seberapa baik kinerjanya". Pemantauan parameter ini sangat penting untuk optimasi energi, pencegahan kondisi operasi yang merusak, dan perencanaan pemeliharaan yang berbasis kondisi. Menurut studi oleh Hydraulic Institute, peningkatan efisiensi pompa sebesar 2-5% melalui pemantauan dan koreksi kinerja dapat menghemat biaya energi hingga 20% dalam siklus hidup pompa (HI 9.6.7, 2015).

1. Efisiensi (Pompa, Kompresor)

Efisiensi adalah ukuran seberapa efektif sebuah mesin mengubah energi input (listrik, uap) menjadi energi output yang berguna (peningkatan tekanan dan aliran fluida).

- **Efisiensi Pompa:** Dinyatakan dalam persen (%), dihitung sebagai rasio antara daya hidrolik yang diberikan kepada fluida terhadap daya poros yang diserap pompa.
 - Daya Hidraulik (P_h): $P_h \text{ (kW)} = (q \times g \times Q \times H) / (3.6 \times 10^6)$, di mana q = densitas (kg/m^3), g = gravitasi, Q = laju aliran (m^3/jam), H = head (m).
 - Daya Poros (P_s): Diukur dengan torsi dan RPM atau diperkirakan dari daya listrik motor dengan memperhitungkan efisiensi motor.

- Efisiensi (η): $\eta = (P_h / P_s) \times 100\%$.
- Titik Efisiensi Terbaik (BEP - Best Efficiency Point): Titik operasi di mana efisiensi maksimum tercapai. Operasi yang berkepanjangan jauh dari BEP (di bawah 70% atau di atas 120% BEP) dapat menyebabkan peningkatan getaran, kavitasi, dan keausan dini.
- **Efisiensi Kompresor:** Juga dinyatakan dalam persen (%), biasanya dihitung sebagai rasio antara daya teoritis (isentropik atau polytropic) yang dibutuhkan untuk mengompresi gas terhadap daya poros aktual yang diserap.
 - Efisiensi yang turun dapat mengindikasikan: kebocoran internal, fouling pada impeller atau diffuser, peningkatan clearance, atau masalah pada sistem katup (untuk reciprocating).

Pemantauan: Efisiensi tidak diukur langsung, tetapi dihitung dari parameter lain (tekanan, aliran, daya). Tren penurunan efisiensi dari waktu ke waktu adalah indikator kuat degradasi kondisi internal mesin.

2. NPSH (Net Positive Suction Head) untuk Pompa

NPSH adalah parameter kritis yang menentukan apakah pompa sentrifugal akan mengalami kavitasi atau tidak. Kavitasi adalah pembentukan dan kolaps gelembung uap di dalam pompa yang menyebabkan erosi, getaran, dan penurunan kinerja.

- **NPSH Tersedia (NPSHA):** Ukuran energi absolut pada sisi hisap pompa di atas tekanan uap fluida. NPSHA adalah karakteristik sistem, dihitung berdasarkan instalasi:

$$NPSHA = P_{\text{suction (abs)}} \pm h_{\text{static}} - h_{\text{friction}} - P_{\text{vapor}}$$
 di mana: P_{suction} = tekanan pada suction flange, h_{static} = ketinggian fluida relatif terhadap pompa, h_{friction} = kehilangan gesekan dalam pipa hisap, P_{vapor} = tekanan uap fluida pada suhu operasi.
- **NPSH Diperlukan (NPSHR):** Energi minimum yang diperlukan pada sisi hisap untuk mencegah kavitasi. NPSHR adalah karakteristik pompa, ditentukan oleh pabrikan melalui pengujian (biasanya untuk 3% penurunan head) dan tercantum dalam kurva kinerja. NPSHR meningkat dengan kuadrat laju aliran.
- **Prinsip Keselamatan:** Untuk operasi bebas kavitasi, harus dipenuhi: $NPSHA > NPSHR$ dengan margin minimal 0.5 - 1 meter, atau sesuai rekomendasi pabrikan (ANSI/HI 9.6.1, 2017). Jika NPSHA mendekati atau kurang dari NPSHR, akan terjadi kavitasi yang ditandai dengan suara berisik seperti kerikil, getaran, dan penurunan head.

Contoh Aplikasi: Pada pompa air yang mengambil dari tangki terbuka, NPSHA dapat ditingkatkan dengan menaikkan level cairan dalam tangki, memperbesar diameter pipa hisap (mengurangi h_{friction}), atau mendinginkan fluida (menurunkan P_{vapor}).

3. Surge dan Stall untuk Kompresor

Ini adalah fenomena ketidakstabilan aliran yang berbahaya pada kompresor dinamis (terutama sentrifugal dan aksial), yang dapat menyebabkan kerusakan katastropik dalam hitungan detik.

- **Surge:** Fenomena sistemik yang melibatkan kompresor dan sistem perpipaan. Terjadi ketika aliran melalui kompresor turun di bawah titik minimum yang stabil (surge point), menyebabkan aliran balik secara periodik dan osilasi tekanan yang keras.
 - Gejala: Getaran dan suara sangat keras seperti "boom" berulang, fluktuasi tekanan dan aliran yang liar, kenaikan suhu discharge.
 - Penyebab: Penutupan valve discharge terlalu cepat, tersumbatnya sistem downstream, tripnya peralatan downstream, atau start-up/shutdown yang tidak benar.
 - Proteksi: Sistem anti-surge control secara otomatis membuka valve bypass (recycle valve) untuk menjaga aliran di atas surge limit.
- **Stall:** Fenomena lokal yang terjadi pada sudu-sudu kompresor, di mana aliran terpisah dari permukaan sudu. Stall dapat bersifat:
 - Rotating Stall: Daerah aliran terpisah yang berputar di sekitar annulus kompresor pada kecepatan sub-synchronous (20-80% RPM), menyebabkan getaran frekuensi rendah.
 - Stall dapat berkembang menjadi surge jika meluas ke seluruh stage.
- **Pemantauan:** Dengan mengamati parameter seperti rasio tekanan, laju aliran, dan kecepatan rotasi terhadap kurva karakteristik kompresor. Sistem kontrol modern menggunakan algoritma untuk mengoperasikan kompresor dengan jarak aman (surge margin) dari garis surge.

4. Kebocoran dan Kondisi Seal

Kondisi sistem penahan kebocoran (sealing system) adalah indikator vital keandalan mesin, terutama untuk fluida berbahaya, bertekanan, atau bernilai tinggi.

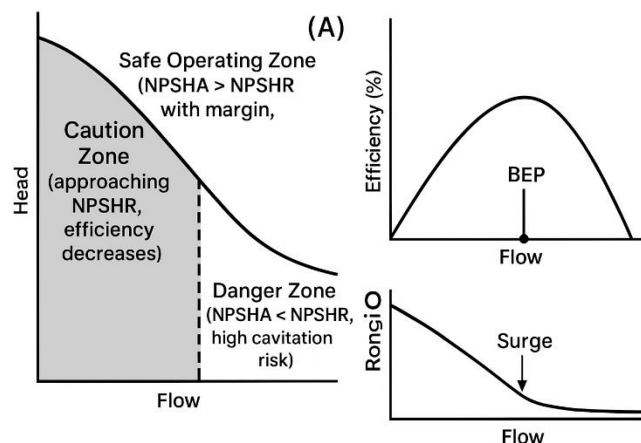
- **Tingkat Kebocoran:** Diukur dalam satuan seperti gram/jam (untuk gas) atau tetes/menit (untuk cairan). Setiap jenis seal memiliki tingkat kebocoran normal yang dapat diterima.
 - Mechanical Seal: Kebocoran normal sangat minim (hanya berupa uap). Kebocoran yang meningkat menjadi aliran cairan menandakan keausan faces, kerusakan secondary seals, atau masalah pada sistem pendukung (flush, quench).
 - Packing/Gland Seal: Dirancang untuk kebocoran minimal yang terkontrol untuk pelumasan dan pendinginan. Kebocoran berlebihan menunjukkan perlu penyetelan ulang atau penggantian.
- **Pemantauan Kondisi Seal:**
 - Visual: Inspeksi kebocoran langsung, adanya deposit, atau asap.
 - Instrumentasi: Untuk seal yang kritis, dilengkapi dengan sensor untuk memantau:
 - Suhu faces seal (indikasi gesekan berlebih atau kekeringan).
 - Tekanan chamber seal (untuk memastikan tekanan flush/quench sesuai).
 - Kebocoran melalui detector (misal, conductivity probe untuk mendeteksi kebocoran cairan ke sistem drain).

- **Dampak Kegagalan Seal:** Kebocoran fluida proses menyebabkan:
 - Kehilangan produk dan biaya.
 - Masalah keselamatan dan lingkungan (kebakaran, toksisitas, polusi).
 - Kontaminasi pada sistem pelumasan atau lingkungan sekitarnya.
 - Kerusakan sekunder pada bantalan karena terpapar fluida proses.

Integrasi dalam Program Pemeliharaan

Parameter kondisi dan kinerja ini sering menjadi dasar untuk analisis akar penyebab (Root Cause Analysis - RCA) dan pengambilan keputusan pemeliharaan:

- Penurunan efisiensi yang bertahap → Perencanaan overhaul untuk membersihkan atau memperbaiki bagian internal.
- NPSHA mendekati NPSHR → Tinjauan ulang sistem hisap atau pertimbangan untuk memodifikasi pompa.
- Operasi mendekati surge line → Verifikasi sistem kontrol anti-surge dan kalibrasi instrumen.
- Peningkatan kebocoran seal → Penjadwalan penggantian seal pada kesempatan shutdown berikutnya.



Gambar 3.3. Hubungan antara kurva kinerja pompa dan parameter kondisi

Deskripsi Gambar 3.3: Diagram yang menunjukkan hubungan antara kurva kinerja pompa dan parameter kondisi. (A) Kurva Head vs. Flow dengan tiga zona: (1) Zona Operasi Aman ($NPSHA > NPSHR$ dengan margin, efisiensi tinggi), (2) Zona Perhatian (mendekati NPSHR, efisiensi turun), (3) Zona Bahaya ($NPSHA < NPSHR$, risiko kavitasi tinggi). (B) Kurva sederhana Efisiensi (%) vs. Flow, menunjukkan titik BEP. (C) Ilustrasi kondisi surge pada kompresor: grafik Pressure Ratio vs. Flow dengan garis surge. Tanda panah menunjukkan titik operasi normal dan arah pergerakan menuju kondisi surge.

Rangkuman dan Aplikasi

Memahami dan memantau parameter kondisi dan kinerja memungkinkan tim operasi dan pemeliharaan untuk:

1. Mengoptimalkan konsumsi energi dengan menjaga mesin beroperasi di dekat BEP.

2. Mencegah mode kegagalan spesifik yang merusak (kavitasi, surge) melalui kontrol operasi yang tepat.
3. Merencanakan intervensi pemeliharaan secara proaktif berdasarkan tren degradasi kinerja, bukan berdasarkan waktu saja.
4. Memastikan integritas containment dengan memantau kondisi seal, sehingga melindungi aset, personel, dan lingkungan.

Parameter-parameter ini merupakan jembatan antara data operasi harian dan strategi manajemen aset jangka panjang untuk mencapai keandalan (reliability) dan keberlanjutan (sustainability) operasi.

3.4 Instrumentasi dan Sistem Monitoring Dasar

Pendahuluan: Mata dan Telinga untuk Mesin

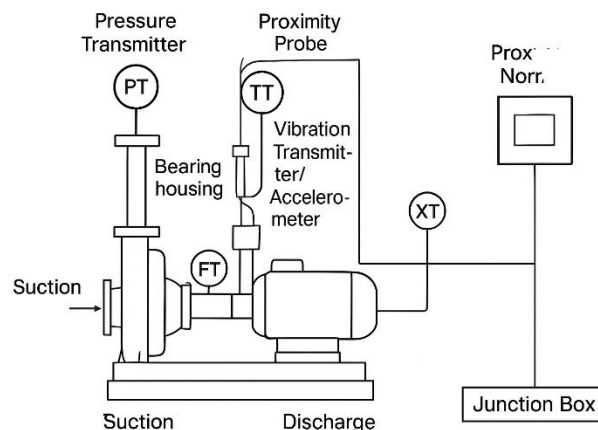
Instrumentasi dan sistem monitoring berfungsi sebagai "mata, telinga, dan sistem saraf" dari mesin berputar, memberikan data objektif yang diperlukan untuk pengambilan keputusan operasional dan pemeliharaan. Tanpa sistem monitoring yang memadai, mesin beroperasi dalam kondisi "buta", di mana masalah hanya terdeteksi setelah terjadi kegagalan atau kerusakan yang signifikan. Implementasi sistem monitoring yang efektif merupakan landasan dari pemeliharaan prediktif (predictive maintenance) dan manajemen aset berbasis kondisi (condition-based asset management). Menurut studi oleh Society for Maintenance & Reliability Professionals (SMRP), organisasi dengan sistem monitoring yang matang dapat mengurangi downtime tak terencana hingga 40% (Society for Maintenance & Reliability Professionals [SMRP], 2020).

1. Sensor yang Umum Digunakan

Sensor mengubah besaran fisik (tekanan, aliran, suhu, getaran) menjadi sinyal listrik yang dapat diukur, dikirim, dan diinterpretasikan.

- a. Sensor Tekanan (Pressure Transmitter/Gauge):
 - Pressure Gauge (Mekanis): Menggunakan tabung Bourdon, diafragma, atau kapsul. Menampilkan tekanan lokal secara langsung. Tipe: analog (jarum) atau digital. Akurasi terbatas ($\pm 1\text{-}2\%$ full scale), cocok untuk indikasi lokal.
 - Pressure Transmitter: Mengubah tekanan menjadi sinyal listrik standar (4-20 mA, 0-10 V) yang dikirim ke sistem kontrol. Lebih akurat ($\pm 0.1\text{-}0.5\%$), dapat dipasang remote. Jenis: piezoresistif, kapasitif (Lipták, 2018).
 - Aplikasi: Memantau suction/discharge pressure pada pompa/kompresor, tekanan oli pelumas.
- b. Sensor Aliran (Flowmeter):
 - Flowmeter Tipe Differential Pressure (Orifice, Venturi): Mengukur perbedaan tekanan di hulu dan hilir alat restriksi. Sederhana, kuat, tetapi akurasi terbatas dan menyebabkan pressure drop.
 - Flowmeter Ultrasonik (Ultrasonic Flowmeter): Menggunakan gelombang ultrasonik yang dipancarkan melalui dinding pipa (clamp-on) atau inline. Akurat, tidak menyebabkan pressure drop, cocok untuk berbagai fluida.

- Flowmeter Elektromagnetik (Magnetic Flowmeter): Hanya untuk cairan konduktif. Sangat akurat, tidak ada bagian yang bergerak, tidak menyebabkan pressure drop (International Society of Automation [ISA], 2009).
 - Aplikasi: Memantau kapasitas pompa, laju aliran bahan baku, atau aliran pendingin.
- c. Sensor Getaran dan Posisi:
- Accelerometer: Mengukur percepatan getaran (m/s^2). Cocok untuk frekuensi tinggi (kerusakan bantalan, gear mesh). Dipasang pada bantalan atau casing.
 - Velocity Sensor (Seismik): Mengukur kecepatan getaran (mm/s). Cocok untuk rentang frekuensi menengah (unbalance, misalignment). Kurang umum untuk pemasangan permanen.
 - Proximity Probe (Eddy Current): Mengukur perpindahan relatif poros (μm) terhadap bantalan. Vital untuk monitoring bantalan luncur dan posisi aksial/radial pada mesin kritis (American Petroleum Institute [API], 2014).
 - Aplikasi: Pemantauan kondisi mekanis, proteksi mesin, dan diagnosis akar masalah.
- d. Sensor Suhu (Temperature Sensor):
- Thermocouple (T/C): Menggunakan dua logam berbeda yang menghasilkan tegangan proporsional dengan perbedaan suhu. Tanggapan cepat, rentang suhu lebar.
 - Resistance Temperature Detector (RTD): Menggunakan perubahan resistansi logam (biasanya platinum) terhadap suhu. Lebih akurat dan stabil dibanding thermocouple.
 - Aplikasi: Memantau suhu bantalan, suhu fluida discharge, suhu winding motor.



Gambar 3.4. Ilustrasi diagram pemasangan sensor pada sebuah pompa sentrifugal

Deskripsi Gambar 3.4: Ilustrasi diagram pemasangan sensor pada sebuah pompa sentrifugal horisontal. Label menunjukkan: (PT) Pressure Transmitter di suction dan discharge, (TT) Temperature Transmitter di bearing housing dan discharge pipe, (FT) Flowmeter di discharge line, (VT) Vibration Transmitter/Accelerometer di bearing housing (radial dan aksial), (XT) Proximity Probe (jika ada) di dekat bantalan. Semua sensor terhubung ke junction box lokal.

2. Sistem DCS/PLC untuk Monitoring

Data dari sensor dikumpulkan dan diproses oleh sistem kontrol untuk monitoring, pencatatan, dan kontrol otomatis.

- Distributed Control System (DCS): Sistem kontrol terdistribusi yang digunakan untuk proses industri yang kompleks dan terintegrasi (seperti di kilang minyak, pabrik kimia, PLTU).
 - Fitur: Redundansi tinggi, keandalan ekstrem, arsitektur terdistribusi (controller tersebar), database terpusat untuk seluruh pabrik.
 - Fungsi dalam Monitoring: Menampilkan real-time semua parameter mesin pada Human-Machine Interface (HMI), mencatat data historis (trending), mengeksekusi kontrol loop kompleks, dan mengaktifkan alarm serta shutdown otomatis berdasarkan logika yang ditetapkan (Blevins et al., 2016).
- Programmable Logic Controller (PLC): Komputer industri yang tangguh, lebih sering digunakan untuk kontrol diskrit atau proses yang lebih sederhana dan modular (seperti pada sistem packaging, conveyor, atau unit mesin tunggal).
 - Fitur: Tangguh, pemrograman sederhana (ladder logic), biaya lebih rendah.
 - Fungsi dalam Monitoring: Mengumpulkan data dari sensor lokal, mengontrol logika start/stop mesin, dan dapat mengirim data ke sistem SCADA untuk visualisasi yang lebih luas.
- Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA): Sistem perangkat lunak dan perangkat keras untuk pengawasan dan akuisisi data tingkat tinggi. Sering digunakan bersama PLC untuk memantau aset yang tersebar geografis (seperti jaringan pipa, pembangkit listrik terdistribusi).
 - Fungsi: Visualisasi grafis proses, alarm, data logging, dan pelaporan.

Contoh Alur Data: Sensor PT-101 (Pressure Transmitter) → Sinyal 4-20 mA → Card input di PLC/DCS → Konversi ke nilai teknik (misal, 0-10 bar) → Ditampilkan di HMI sebagai "P-101 Discharge Pressure" dan disimpan dalam database → Jika nilai melebihi setpoint tinggi (misal, 9.5 bar), sistem membangkitkan alarm dan dapat mengeksekusi logika (misal, membuka relief valve).

3. Pengantar Pemantauan Kondisi

Pemantauan Kondisi atau *Condition Monitoring* (CM) adalah proses pengumpulan dan analisis data secara berkala atau terus-menerus untuk menentukan perubahan kondisi suatu aset dari kondisi normalnya, guna memprediksi kapan pemeliharaan harus dilakukan.

- Prinsip Dasar: Setiap mesin yang mulai mengalami degradasi (misalnya, keausan bantalan, ketidakseimbangan rotor) akan menunjukkan perubahan dalam satu atau lebih parameter fisiknya (getaran, suhu, kebisingan, performa) sebelum akhirnya gagal.
- Tujuan: Beralih dari pemeliharaan reaktif (run-to-failure) atau berbasis waktu (preventive) ke pemeliharaan berbasis kondisi (predictive maintenance), sehingga intervensi hanya dilakukan ketika diperlukan, memaksimalkan ketersediaan mesin dan meminimalkan biaya (Mobley, 2002).
- Teknik Condition Monitoring yang Umum:

- 1) Analisis Getaran (Vibration Analysis): Teknik paling umum dan efektif untuk mesin berputar (Scheffer & Girdhar, 2004).
 - 2) Analisis Termografi (Thermography): Menggunakan kamera infrared untuk mendeteksi titik panas yang mengindikasikan gesekan berlebih, masalah listrik, atau isolasi yang buruk.
 - 3) Analisis Pelumas (Oil Analysis): Menganalisis sampel oli/pelumas untuk mendeteksi keausan logam (spektroskopi), kontaminasi (air, debu), dan degradasi oli itu sendiri.
 - 4) Analisis Arus Motor (Motor Current Analysis): Mendeteksi masalah pada motor listrik seperti rotor bar break, eccentricity, atau masalah beban.
- Tingkatan Implementasi CM:
 - Periodic/Route-based: Teknisi menggunakan perangkat portabel (vibration analyzer, thermal gun) untuk mengumpulkan data secara rutin (misal, bulanan) pada titik-titik pengukuran yang telah ditentukan.
 - Continuous/Online Monitoring: Sensor dipasang secara permanen dan terhubung ke sistem yang terus-menerus memantau. Diperlukan untuk mesin-mesin kritis yang keagalannya berdampak besar. Sistem ini sering dilengkapi dengan proteksi (trip) otomatis.

Rangkuman dan Langkah Awal Implementasi

Implementasi sistem monitoring yang efektif dimulai dengan langkah-langkah berikut:

1. Identifikasi Mesin Kritis: Fokuskan sumber daya pada mesin yang dampak keagalannya paling besar (berdasarkan klasifikasi kritisitas dari Subbab 3.2.4).
2. Pemilihan Parameter dan Sensor: Tentukan parameter kunci yang akan dipantau (misal, getaran dan suhu bantalan untuk pompa sentrifugal) dan pilih sensor yang sesuai.
3. Penetapan Baseline dan Batas Normal: Kumpulkan data saat mesin dalam kondisi sehat untuk dijadikan baseline. Tetapkan batas alarm dan trip berdasarkan standar (seperti ISO 10816) dan pengalaman.
4. Pelatihan Personel: Operator dan teknisi harus mampu membaca indikasi dasar, memahami arti alarm, dan melakukan pengambilan data rutin.

Dengan memahami instrumentasi dan sistem monitoring dasar, teknisi tidak hanya menjadi pengamat pasif, tetapi menjadi mitra aktif dalam menjaga keandalan aset, mengoptimalkan kinerja, dan menjamin keselamatan operasi.

LATIHAN/TUGAS

Studi Kasus 1

Analisis Parameter Proses Pompa Sentrifugal Sistem Pendingin

Deskripsi Kasus:

Sebuah pompa sentrifugal horizontal digunakan untuk mensirkulasikan air pendingin menuju heat exchanger di sebuah pabrik kimia. Spesifikasi desain pompa adalah sebagai berikut:

- Kapasitas desain: 120 m³/jam
- Tekanan discharge normal: 8 bar
- Tekanan suction normal: 2,5 bar (absolut)
- Temperatur fluida desain: 30°C

Data operasi aktual selama 2 minggu terakhir menunjukkan:

- Tekanan suction turun menjadi 1,8 bar
- Tekanan discharge relatif stabil di 8 bar
- Laju aliran turun menjadi 95 m³/jam
- Temperatur fluida naik menjadi 38°C
- Operator melaporkan suara bising seperti “kerikil” dari pompa

Pertanyaan:

1. Identifikasi parameter proses yang menyimpang dari kondisi normal.
2. Jelaskan fenomena yang kemungkinan sedang terjadi pada pompa.
3. Hubungkan perubahan temperatur fluida dengan parameter NPSH.
4. Sebutkan minimal tiga tindakan korektif yang dapat dilakukan untuk mencegah kerusakan lebih lanjut.
5. Jika kondisi ini dibiarkan, komponen apa yang paling berisiko mengalami kegagalan?

Studi Kasus 2

Evaluasi Parameter Mekanis Berdasarkan Data Getaran

Deskripsi Kasus:

Sebuah pompa sentrifugal yang digerakkan motor listrik 1.500 RPM dipantau menggunakan vibration analyzer. Data spektrum FFT menunjukkan:

- Puncak dominan pada 1X RPM (25 Hz) dengan amplitudo 6,5 mm/s RMS
- Puncak kecil pada 2X RPM
- Nilai ambang ISO 10816 untuk mesin kelas II adalah 4,5 mm/s RMS
- Temperatur bantalan masih dalam batas normal

Pertanyaan:

1. Berdasarkan data spektrum, identifikasi jenis gangguan mekanis yang paling dominan.
2. Mengapa getaran 1X RPM sering dikaitkan dengan gangguan tertentu?
3. Jelaskan risiko operasi mesin jika getaran melebihi batas ISO 10816.
4. Tindakan pemeliharaan apa yang paling tepat dilakukan terlebih dahulu?
5. Parameter tambahan apa yang perlu dipantau setelah tindakan korektif dilakukan?

Studi Kasus 3

Analisis Kinerja Pompa terhadap Kurva dan BEP

Deskripsi Kasus:

Sebuah pompa sentrifugal beroperasi pada:

- Laju aliran: 70% dari kapasitas BEP
- Efisiensi aktual turun dari 78% menjadi 68% dalam 6 bulan
- Daya motor meningkat 8% dibandingkan kondisi awal
- Getaran meningkat secara bertahap namun masih dalam batas diizinkan

Pertanyaan:

1. Jelaskan hubungan antara posisi operasi terhadap BEP dengan efisiensi dan getaran.
2. Apa kemungkinan penyebab penurunan efisiensi yang terjadi secara gradual?
3. Mengapa daya motor justru meningkat meskipun kapasitas menurun?
4. Parameter apa yang paling tepat digunakan sebagai indikator degradasi internal pompa?
5. Apakah kondisi ini lebih tepat ditangani dengan pemeliharaan preventif atau prediktif? Jelaskan alasannya.

Studi Kasus 4

Deteksi Dini Surge pada Kompresor Sentrifugal

Deskripsi Kasus:

Sebuah kompresor sentrifugal pada unit proses gas mengalami kondisi berikut:

- Penurunan laju aliran secara tiba-tiba
- Fluktuasi tekanan discharge yang cepat
- Kenaikan temperatur discharge sebesar 15°C
- Getaran frekuensi rendah meningkat secara tidak stabil
- Sistem anti-surge belum aktif

Pertanyaan:

1. Identifikasi fenomena operasi yang kemungkinan sedang terjadi.
2. Bedakan secara singkat antara surge dan rotating stall.
3. Parameter apa saja yang menjadi indikator utama mendekati kondisi surge?
4. Jelaskan peran sistem anti-surge dalam mencegah kerusakan kompresor.
5. Jika kejadian ini berulang, aspek apa dari sistem kontrol yang perlu dievaluasi?

Studi Kasus 5

Evaluasi Kondisi Seal dan Dampaknya terhadap Keandalan

Deskripsi Kasus:

Sebuah pompa proses menggunakan mechanical seal tunggal. Dalam inspeksi rutin ditemukan:

- Kebocoran cairan proses ± 15 tetes/menit
- Temperatur housing seal meningkat 12°C dari normal
- Tekanan flush seal lebih rendah dari spesifikasi
- Terdapat residu kristal di sekitar seal

Pertanyaan:

1. Apakah tingkat kebocoran tersebut masih dapat diterima untuk mechanical seal? Jelaskan.
2. Identifikasi kemungkinan penyebab utama kegagalan seal.
3. Parameter instrumentasi apa yang seharusnya dipantau untuk mencegah kondisi ini sejak dini?
4. Apa dampak kegagalan seal terhadap keselamatan dan lingkungan?
5. Rekomendasikan tindakan jangka pendek dan jangka panjang.

Studi Kasus 6

Perancangan Sistem Monitoring Dasar

Deskripsi Kasus:

Sebuah pabrik akan memasang sistem monitoring pada satu unit pompa sentrifugal kritis yang beroperasi 24 jam. Kegagalan pompa menyebabkan shutdown proses utama.

Pertanyaan:

1. Tentukan minimal lima parameter utama yang wajib dimonitor secara kontinu.
2. Jenis sensor apa yang sesuai untuk masing-masing parameter tersebut?
3. Apakah sistem PLC + SCADA sudah memadai atau perlu DCS? Jelaskan alasan teknisnya.
4. Parameter mana yang sebaiknya diberi alarm dan mana yang diberi trip otomatis?
5. Jelaskan langkah penetapan baseline dan batas alarm awal.

DAFTAR PUSTAKA

1. American Petroleum Institute. (2014). *API Standard 670: Machinery protection systems* (5th ed.).
2. Blevins, T., McMillan, G., Wojsznis, W., & Brown, M. (2016). *Advanced control unleashed: Plant performance management for optimal benefit*. International Society of Automation.
3. International Society of Automation. (2009). *ISA-75.01.01-2007 (R2015) Flow equations for sizing control valves*.
4. Lipták, B. G. (2018). *Instrument engineers' handbook, Vol. 1: Process measurement and analysis* (5th ed.). CRC Press.
5. Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
6. Scheffer, C., & Girdhar, P. (2004). *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*. Newnes.
7. Society for Maintenance & Reliability Professionals. (2020). *SMRP best practices and metrics guide*. <https://www.smrp.org>

LAMPIRAN: KUNCI JAWABAN LATIHAN

A. KUNCI JAWABAN LATIHAN/TUGAS MODUL 1

Jawaban Soal 1:

- Rotor
- Rotasi

Sitasi: Bloch & Geitner (2012) mendefinisikan inti mesin berputar pada komponen rotor yang berputar.

Jawaban Soal 2:

- Mesin Penggerak (Driven/Power Absorption Machinery)
- Kompresor

Sitasi: Klasifikasi berdasarkan arah energi, di mana mesin yang menyerap daya untuk meningkatkan energi fluida disebut driven machinery, contohnya kompresor (ASME, 2021; Sayers, 1990).

Jawaban Soal 3:

Seals atau Paking

Sitasi: Komponen seals berfungsi sebagai penahan kebocoran antara bagian statis dan dinamis (Bloch & Geitner, 2012).

Jawaban Soal 4:

- Kecepatan Kritis (Critical Speed) / Resonansi
- Getaran berlebihan, keausan cepat, atau kegagalan struktural (jawaban mirip diterima)

Sitasi: Operasi di sekitar kecepatan kritis dimana frekuensi putaran beresonansi dengan frekuensi natural sistem sangat berbahaya (Vance, Zeidan, & Murphy, 2010; ISO 21940-11, 2017).

Jawaban Soal 5:

(Pilih dua dari tiga berikut)

- Getaran (Vibration)
- Suhu Bantalan (Bearing Temperature)
- Perpindahan Aksial (Axial Displacement)

Sitasi: Parameter-parameter ini merupakan indikator utama kesehatan mesin dalam program condition monitoring (Rao, 1996).

B. KUNCI JAWABAN LATIHAN MODUL 2

Studi Kasus 1 – Analisis Fungsi Mesin dalam Sistem

Sistem Pendingin Heat Exchanger Pabrik Pupuk

Contoh Jawaban Ideal

1. Klasifikasi Mesin Berdasarkan Fungsi dalam Sistem

- Motor listrik 200 kW diklasifikasikan sebagai *supporting rotating equipment* yang berperan sebagai sumber energi mekanik bagi sistem pendingin.
 - Kopling fleksibel dan gearbox reduksi termasuk *power transmission equipment* karena berfungsi menyalurkan dan menyesuaikan torsi serta kecepatan putar dari motor ke pompa.
 - Pompa sentrifugal diklasifikasikan sebagai *driven machinery* karena menggunakan energi mekanik untuk meningkatkan tekanan dan mengalirkan fluida pendingin.
2. Peran Masing-Masing Mesin
- Motor listrik menyediakan daya putar kontinu.
 - Kopling dan gearbox memastikan daya disalurkan dengan aman, mengakomodasi misalignment, dan menurunkan kecepatan sesuai kebutuhan pompa.
 - Pompa sentrifugal memastikan sirkulasi air pendingin ke heat exchanger agar proses tetap berada pada temperatur aman.
3. Analisis Dampak Kegagalan
- Kegagalan motor listrik menghentikan seluruh sistem pendingin, menyebabkan overheating dan shutdown unit proses.
 - Kegagalan gearbox atau kopling dapat menimbulkan getaran berlebih dan kerusakan lanjutan pada pompa.
 - Kegagalan pompa menyebabkan hilangnya aliran pendingin, sehingga berdampak langsung pada keselamatan dan kontinuitas operasi.

Studi Kasus 2 – Pemilihan Prinsip Kerja Mesin

Transfer Crude Palm Oil (CPO)

Contoh Jawaban Ideal

1. Perbandingan Prinsip Kerja
 - Pompa sentrifugal bekerja berdasarkan perubahan momentum fluida secara kontinu dan sangat sensitif terhadap viskositas.
 - Pompa screw (positive displacement) bekerja dengan menjebak dan memindahkan volume fluida secara mekanis, sehingga aliran relatif konstan meskipun viskositas berubah.
2. Pemilihan Pompa yang Tepat
 - Pompa screw lebih sesuai karena CPO memiliki viskositas tinggi dan dapat berubah akibat fluktuasi temperatur.
 - Pompa ini mampu mempertahankan kapasitas aliran dan menghasilkan tekanan yang stabil tanpa penurunan efisiensi signifikan.
3. Potensi Masalah Jika Salah Pilih
 - Penggunaan pompa sentrifugal dapat menyebabkan penurunan head, konsumsi energi berlebih, risiko kavitasi, dan kegagalan mencapai tekanan sistem.
 - Efisiensi operasi menjadi rendah dan biaya pemeliharaan meningkat.

Studi Kasus 3 – Kecepatan Putar dan Implikasi Pemeliharaan

Kompresor Sentrifugal 18.000 RPM

Contoh Jawaban Ideal

1. Klasifikasi Kecepatan Putar
 - Mesin dikategorikan sebagai mesin berkecepatan tinggi (high-speed rotating machinery).
2. Analisis Sensitivitas Getaran
 - Pada kecepatan tinggi, gaya sentrifugal dan respons dinamis rotor meningkat tajam.
 - Mesin berpotensi melewati kecepatan kritis saat start-up dan shutdown, sehingga memicu resonansi dan peningkatan getaran.
3. Rekomendasi Operasi dan Pemeliharaan
 - Terapkan prosedur start-up dan shutdown yang terkontrol untuk melewati critical speed dengan cepat.
 - Lakukan balancing presisi tinggi dan monitoring getaran online.
 - Evaluasi kondisi bantalan dan sistem pelumasan secara rutin.

Studi Kasus 4 – Single-Stage vs Multi-Stage

Pompa Boiler Feed Water PLTU

Contoh Jawaban Ideal

1. Alasan Teknis Penggunaan Multi-Stage
 - Tekanan sangat tinggi (>150 bar) tidak dapat dicapai secara efisien oleh pompa single-stage.
 - Pompa multi-stage memungkinkan penambahan energi secara bertahap sehingga tekanan total tinggi dapat dicapai dengan efisiensi baik.
2. Perbandingan Desain dan Pemeliharaan
 - Pompa single-stage: desain sederhana, perawatan mudah, tetapi kemampuan tekanan terbatas.
 - Pompa multi-stage: desain kompleks, clearance ketat, perawatan lebih rumit, namun unggul dalam aplikasi tekanan tinggi.
3. Risiko Jika Menggunakan Single-Stage
 - Kegagalan mencapai tekanan operasi.
 - Beban mekanis dan hidraulik berlebih yang mempercepat kerusakan impeler dan bantalan.

Studi Kasus 5 – Kritisitas Mesin dan Standar Industri

Pompa Charge di Kilang Minyak

Contoh Jawaban Ideal

1. Penentuan Kritisitas
 - Pompa termasuk mesin proses kritis karena kegagalannya dapat menyebabkan shutdown besar, kerugian finansial tinggi, serta risiko keselamatan dan lingkungan.
2. Alasan Penerapan Standar API

- Standar API 610 menjamin desain yang andal, material berkekuatan tinggi, serta persyaratan pengujian dan dokumentasi yang ketat.
 - Standar komersial umum tidak cukup untuk menjamin keselamatan dan keandalan pada aplikasi berisiko tinggi.
3. Perbedaan Pendekatan Pemeliharaan
- Mesin kritis: menggunakan condition-based maintenance, monitoring getaran online, analisis pelumas, dan manajemen spare part strategis.
 - Mesin non-kritis: cukup dengan pemeliharaan preventif berbasis waktu dan inspeksi rutin sederhana.

C. KUNCI JAWABAN LATIHAN MODUL 3

Studi Kasus 1

Analisis Parameter Proses Pompa Sentrifugal Sistem Pendingin

1. Parameter yang menyimpang
 - Tekanan suction turun (2,5 bar → 1,8 bar).
 - Laju aliran turun (120 m³/jam → 95 m³/jam).
 - Temperatur fluida meningkat (30°C → 38°C).
 - Muncul suara abnormal dari pompa.
2. Fenomena yang terjadi
 - Pompa mengalami kavitasi akibat NPSHA menurun hingga mendekati atau lebih kecil dari NPSHR.
3. Hubungan temperatur fluida dengan NPSH
 - Kenaikan temperatur meningkatkan tekanan uap fluida, sehingga NPSHA menurun dan risiko kavitasi meningkat.
4. Tindakan korektif
 - Meningkatkan tekanan suction (menaikkan level tangki atau memperbaiki sistem hisap).
 - Mengurangi kehilangan gesek pada pipa suction (membersihkan strainer, memperbesar diameter pipa).
 - Menurunkan temperatur fluida (meningkatkan efisiensi pendinginan).
 - Mengoperasikan pompa lebih dekat ke BEP.
5. Komponen paling berisiko rusak
 - Impeller dan casing pompa (erosi akibat kavitasi).
 - Mechanical seal dan bantalan akibat getaran dan fluktuasi tekanan.

Studi Kasus 2

Evaluasi Parameter Mekanis Berdasarkan Data Getaran

1. Gangguan mekanis dominan
 - Unbalance rotor, ditunjukkan oleh puncak dominan pada 1X RPM.
2. Alasan 1X RPM terkait gangguan tertentu
 - Ketidakeimbangan massa menghasilkan gaya sentrifugal yang berulang sekali setiap putaran poros.
3. Risiko jika getaran melebihi ISO 10816

- Keausan bantalan lebih cepat.
- Kegagalan seal.
- Potensi kerusakan poros dan fondasi.
- 4. Tindakan pemeliharaan utama
 - Dynamic balancing pada rotor/pompa.
- 5. Parameter tambahan yang perlu dipantau
 - Getaran pasca-balancing.
 - Temperatur bantalan.
 - Arus motor (indikasi beban).

Studi Kasus 3

Analisis Kinerja Pompa terhadap BEP

1. Hubungan operasi dengan BEP
 - Operasi di bawah BEP menyebabkan efisiensi turun dan gaya hidraulik tidak seimbang, meningkatkan getaran.
2. Penyebab penurunan efisiensi
 - Fouling pada impeller/diffuser.
 - Keausan internal dan peningkatan clearance.
 - Perubahan sifat fluida.
3. Alasan daya motor meningkat
 - Kerugian hidraulik meningkat sehingga pompa memerlukan daya lebih besar untuk menghasilkan output yang sama.
4. Indikator degradasi internal
 - Tren efisiensi dan daya spesifik (kW/m^3).
5. Jenis pemeliharaan yang tepat
 - Pemeliharaan prediktif, karena degradasi terjadi bertahap dan dapat dipantau melalui tren kinerja.

Studi Kasus 4

Deteksi Dini Surge pada Kompresor

1. Fenomena yang terjadi
 - Surge kompresor.
2. Perbedaan surge dan rotating stall
 - Surge: ketidakstabilan sistemik, melibatkan aliran balik dan osilasi tekanan besar.
 - Rotating stall: fenomena lokal pada sudu, bersifat parsial dan berfrekuensi sub-synchronous.
3. Indikator utama mendekati surge
 - Penurunan laju aliran.
 - Fluktuasi tekanan discharge.
 - Kenaikan temperatur discharge.
 - Getaran frekuensi rendah tidak stabil.
4. Peran sistem anti-surge

- Menjaga aliran di atas batas minimum stabil dengan membuka recycle/bypass valve.
- 5. Aspek sistem kontrol yang perlu dievaluasi
 - Setpoint dan respon valve anti-surge.
 - Keandalan sensor aliran dan tekanan.
 - Logika kontrol start-up dan shutdown.

Studi Kasus 5

Evaluasi Kondisi Seal

1. Tingkat kebocoran
 - Tidak dapat diterima untuk mechanical seal (harus minimal/uap saja).
2. Penyebab utama
 - Tekanan flush tidak mencukupi.
 - Keausan seal faces.
 - Kristalisasi fluida proses.
3. Parameter yang perlu dimonitor
 - Suhu seal.
 - Tekanan dan aliran flush.
 - Deteksi kebocoran.
4. Dampak kegagalan seal
 - Kehilangan produk.
 - Risiko keselamatan dan pencemaran lingkungan.
 - Kerusakan bantalan sekunder.
5. Rekomendasi tindakan
 - Jangka pendek: perbaiki sistem flush dan kurangi kebocoran.
 - Jangka panjang: evaluasi desain seal dan kondisi operasi.

Studi Kasus 6

Perancangan Sistem Monitoring Dasar

1. Parameter utama
 - Tekanan suction & discharge.
 - Laju aliran.
 - Getaran bantalan.
 - Temperatur bantalan.
 - Daya/arus motor.
2. Jenis sensor
 - Pressure transmitter.
 - Flowmeter (ultrasonik/magnetik).
 - Accelerometer atau vibration transmitter.
 - RTD atau thermocouple.
 - Current transformer (CT).
3. Sistem kontrol

- PLC + SCADA sudah memadai untuk satu unit mesin kritis, DCS diperlukan bila terintegrasi dengan proses kompleks.
- 4. Alarm dan trip
 - Alarm: getaran tinggi, suhu bantalan tinggi.
 - Trip: getaran ekstrem, kehilangan tekanan pelumas.
- 5. Penetapan baseline
 - Pengukuran saat mesin sehat.
 - Penetapan batas berdasarkan standar (ISO/API) dan pengalaman operasi.

