

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu yang Relevan

2.1.1 Analisa Getaran Pengaruh Variabel *Misalignment*

Pada tahun 2021, Azhari Akbar dan Djoko W Karmiadji melakukan analisa mengenai vibrasi yang disebabkan oleh *misalignment* pada pompa sentrifugal dalam penelitiannya yang berjudul "Analisa Getaran Pengaruh Variabel *Misalignment*". Penelitian tersebut bertujuan menemukan frekuensi getaran akibat *misalignment* pada mesin yang beroperasi pada 3000 rpm dan menentukan umur pemakaian *bearing* pada mesin yang tetap beroperasi dalam keadaan vibrasi akibat *misalignment*.

2.1.2 Metodologi yang Digunakan

Pengambilan data dilakukan pada titik *bearing* pompa DE (*Drive End*) dan NDE (*Non-Drive End*) pada posisi horizontal, vertikal, dan aksial. Metode yang digunakan meliputi pengukuran *overall velocity vibration*, spektrum FFT (*Fast Fourier Transformation*), dan *enveloping bearing*.

2.1.3 Hasil Penelitian

Menurut Azhari Akbar dan Djoko W Karmiadji dalam penelitiannya, karakteristik vibrasi yang disebabkan oleh *misalignment* diantaranya yaitu:

- a. Frekuensi penyimpangan misalignment muncul pada 1X dan 2X order putaran mesin, dalam hal ini pada putaran mesin 3000 rpm spectrum muncul pada frekuensi 50 dan 100 hz.
- b. Mesin yang terus beroperasi dalam keadaan misalignment akan membuat getaran yang besar, sehingga jika terus dibiarkan akan mengakibatkan bearing menjadi cacat.

2.2 Gambaran Umum *Condensate Extraction Pump*

Condensate extraction pump (CEP) merupakan salah satu peralatan krusial di dalam siklus pembangkit listrik tenaga uap. Pompa ini berfungsi untuk menjaga tekanan vakum di dalam kondenser bersama – sama dengan *vacuum pump* dan juga berfungsi untuk memompakan air hasil kondensasi dari *hot well condenser* (Effendi, 2025) menuju ke *low pressure heater* untuk dipanaskan kembali sebelum dialirkan ke *dearator* sehingga tercipta sistem siklus tertutup. Hal ini sangat penting karena debit kondensat harus disesuaikan agar jumlah kondensat yang dihasilkan sesuai dengan kebutuhan siklus uap yang saat itu berjalan. Dan juga dengan begitu dapat mengurangi penggunaan air *demin* dan menjaga kualitas air umpan boiler sehingga efisiensi tetap tinggi.

2.3 Bagian Utama *Condensate Extraction Pump*

Bagian-bagian utama *Condensate Extraction Pump* (CEP) pada dasarnya serupa dengan pompa sentrifugal konvensional, yang terdiri dari dua bagian utama yaitu elemen berputar, termasuk *impeller* dan *shaft*, dan elemen stasioner yang terdiri dari *casing*, penutup *casing* serta *bearing* (Karassik et al., 2008). Namun, perbedaan fundamentalnya terletak pada penggunaan susunan *impeller* jamak atau sistem *multistage*. Desain ini diaplikasikan secara khusus agar pompa mampu menghasilkan kapasitas debit aliran yang besar sekaligus tekanan *discharge* yang tinggi untuk mendistribusikan air kondensat. Oleh karena itu, CEP diklasifikasikan ke dalam kategori pompa *centrifugal axial multistage*. Struktur ini memungkinkan peningkatan tekanan secara bertahap pada setiap tingkat *impeller*, yang sangat krusial guna mengatasi resistansi sistem serta memastikan efisiensi perpindahan fluida dalam siklus termodinamika tetap terjaga secara optimal.



Gambar 2. 1. Condensate Extraction Pump (CEP)

Sumber : PT Indo Raya Tenaga, 2025

2.4 Instrumentasi pada Condensate Extraction Pump

Peralatan instrumen yang digunakan pada *condensate extraction pump (CEP)* diantaranya yaitu *vibration monitoring system (VMS)*, *resistance temperature detector (RTD)*, *pressure indicator* dan juga *flow meter*.

2.3.1 Vibration Monitoring System (VMS)

VMS berfungsi untuk memonitor kesehatan *CEP* melalui perilaku vibrasinya. Pada VMS kita dapat melihat nilai vibrasi pada setiap titik yang dipasang sensor vibrasi, putaran mesin, dan juga spektrum vibrasi yang digunakan untuk menganalisa kemungkinan kerusakan yang akan terjadi pada peralatan tersebut melalui pola vibrasinya.

Pada peralatan set VMS terdapat beberapa komponen utama yang diantaranya yaitu *vibration probe*, *proximitior*, *vibration data processing module (VDPM)*, *rack*, dan *computer*.

2.3.2 Resistance Temperature Detector (RTD)

RTD (Resistance Temperature Detector) adalah sensor suhu digunakan untuk mendeteksi nilai temperatur sebuah mesin melalui perubahan resistansi listrik. Prinsip kerja sensor ini yaitu didasarkan pada karakteristik material sensor yang mengalami perubahan hambatan listrik seiring dengan perubahan suhu di sekitarnya.

2.3.3 Pressure indicator (PI)

PI (Pressure indicator) merupakan salah satu alat ukur untuk memantau besaran tekanan fluida yang melewati sistem perpipaan yang masih banyak digunakan hingga saat ini. Terdapat beberapa poin penempatan *pressure indicator* yaitu sebelum *suction* pompa dan juga setelah *discharge* pompa. Atau ada juga yang dipasang sebelum dan sesudah *strainer* atau *filter* untuk mengetahui perbedaan tekanan yang terjadi (*differential pressure*).

2.3.4 Flow meter

Flow meter digunakan untuk mengetahui seberapa besar laju aliran kecepatan fluida yang melalui sebuah pipa. Pada rangkaian pompa, pada umumnya *flow meter* dipasang di bagian *discharge* pompa (Sugiri & Setiawan, 2023).

2.5 Cara Kerja dan Pemasangan CEP

Condensate extraction pump (CEP) mempunyai dua cara kerja yang berbeda. Pada teknologi terdahulu, *CEP* tetap beroperasi pada putaran maksimumnya walaupun *load* yang dihasilkan oleh generator naik maupun turun. Pada sistem ini yang bekerja untuk mengatur aliran kondensat agar siklus tetap seimbang yaitu *Boiler Feedwater Pump* dan juga *Flow Control Valve*. Namun pada teknologi terbaru yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, *CEP* pada siklus turbin uap bekerja mengikuti naik turunnya *load* yang dihasilkan oleh *Generator*.

dengan cara menambahkan *Variable Frequency Drive (VFD)* pada bagian motor *CEP*. Jika *load* naik, maka turbin menghasilkan lebih banyak uap sehingga proses kondensasi meningkat. Oleh karena hal ini *CEP* secara otomatis menaikkan putaran mesinnya untuk memperbesar debit aliran air kondensat agar siklus tetap seimbang. Sebaliknya, saat *load* turun, produksi uap berkurang sehingga kondensat juga berkurang. Oleh karenanya, *CEP* menyesuaikan dengan menurunkan putaran mesinnya untuk memperkecil debitnya agar tidak terlalu banyak memompa air kondensat.

2.6 Predictive Maintenance (PdM)

PdM (Predictive Maintenance) merupakan salah satu jenis perawatan yang digunakan untuk memprediksi keadaan mesin di masa depan. Pada dasarnya *predictive maintenance* tidak dapat memperpanjang umur mesin, namun pemeliharaan prediktif jauh lebih unggul daripada metode pemeliharaan lainnya, secara signifikan meningkatkan produktivitas, kualitas produk, dan efisiensi manufaktur. Solusi manajemen pemeliharaan prediktif sangat hemat biaya dan menggunakan alat-alat seperti pemantauan getaran, pencitraan termal, dan tribologi untuk mendapatkan kondisi operasi aktual berdasarkan data rencana aktivitas pemeliharaan (Akbar & Karmiadji, 2021). *Predictive maintenance* juga dikenal sebagai *Condition Based Maintenance (CBM)*.

Praktikal *CBM* dilakukan dengan mengumpulkan data – data mesin melalui pemantauan vibrasi, kondisi pelumas, kondisi temperatur serta kebisingan. Kemudian data – data tersebut diperhatikan perubahan pola dan perilakunya untuk mendeteksi kerusakan lebih dini. Keuntungan dari *predictive maintenance* yaitu: (Salman, 2025)

- a. Meminimalisir atau mengeliminasi waktu henti yang merugikan (meningkatkan waktu operasional yang menguntungkan).
- b. Meminimalkan atau menghilangkan kegagalan mesin yang fatal. Kerusakan akibat kegagalan fatal biasanya jauh lebih parah daripada yang seharusnya.

- c. Mengurangi biaya perawatan.
- d. Mengurangi perawatan yang tidak terjadwal. Perbaikan dapat dilakukan tepat waktu sehingga tidak memengaruhi produksi.
- e. Mengurangi inventaris suku cadang. Banyak suku cadang dapat dibeli tepat waktu untuk perbaikan yang dapat dilakukan selama penghentian mesin terjadwal.
- f. Mengoptimalkan kinerja mesin – mesin selalu beroperasi sesuai spesifikasi.
- g. Mengurangi konsumsi daya listrik yang berlebihan akibat kinerja mesin tidak efisien.
- h. Mengurangi kebutuhan akan peralatan siaga atau ruang lantai tambahan untuk mengatasi waktu henti yang berlebihan.
- i. Meningkatkan kapasitas pabrik.

2.7 Pengertian Vibrasi Pada Mesin

Vibrasi pada mesin merupakan pergerakan mekanis yang dihasilkan oleh elemen berputar di sekitar sumbu referensi *shaft*. Pada dasarnya semua mesin yang berputar pasti menghasilkan vibrasi. Hanya saja, vibrasi tersebut masih dalam batas toleransi atau melebihi batas toleransi yang telah ditentukan oleh pabrik pembuat mesin ataupun oleh ISO. Jika mesin tetap dioperasikan pada saat vibrasinya melebihi batas yang telah ditentukan, maka mesin tersebut berpeluang besar untuk mengalami kegagalan.

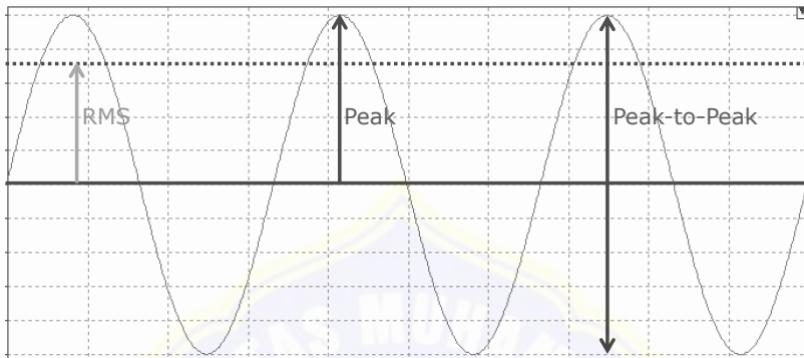
2.8 Parameter Vibrasi

Untuk memahami lebih dalam mengenai vibrasi, terdapat parameter dasar vibrasi yang harus dipahami yaitu *amplitude*, *zero peak*, *peak to peak*, *RMS*, periode dan frekuensi.

2.7.1 Amplitude

Amplitude merupakan titik tertinggi penyimpangan dari sumbunya. Dalam mesin berputar, dapat dikatakan *amplitude* merupakan nilai vibrasi tertinggi yang digunakan untuk menentukan vibrasi mesin tersebut masih dalam batas toleransi atau tidak.

Amplitude dapat dinyatakan dalam beberapa satuan yang diantaranya yaitu *peak*, *peak to peak*, dan *rms*.



Gambar 2. 2. Satuan Vibrasi
Sumber: (Mobius Institute, 2014)

2.7.2 *Peak (0 – P)*

Peak atau biasa disebut “*Zero Peak*” merupakan *amplitude* vibrasi yang diukur dari garis sumbu sampai ke puncak atau lembah sebuah gelombang.

2.7.3 *Peak to Peak (P – P)*

Peak to Peak merupakan *amplitude* vibrasi yang diukur dari titik terendah sebuah gelombang (lembah) hingga ke titik tertinggi sebuah gelombang (puncak). Ataupun dalam sebuah gelombang sinusoidal dapat dikatakan $P - P$ merupakan 2 kali $0 - P$.

2.7.4 *RMS (Root Mean Square)*

RMS secara umum menggambarkan rata – rata jumlah energi yang terkandung di dalam vibrasi (Mobius Institute, 2014). *RMS* merupakan satuan *amplitude* yang digunakan untuk pengukuran vibrasi rata – rata secara keseluruhan. Hal ini dikarenakan, dalam sebuah gelombang sinusoidal sempurna, *RMS* muncul sebanyak empat kali. Oleh karenanya *amplitude RMS* sangat cocok digunakan dalam pengukuran vibrasi rata – rata secara keseluruhan.

2.7.5 Periode

Periode merupakan jumlah waktu yang dibutuhkan untuk membentuk satu gelombang sempurna (Mobius Institute, 2014). Satu gelombang sempurna dapat digambarkan sebagai gelombang yang memiliki satu puncak dan satu lembah. Periode umumnya dilambangkan dengan huruf "T" dengan satuan detik atau mili detik. Periode dapat dapat dihitung dari frekuensi. Periode (detik) = 1 / Frekuensi (Hz).

2.7.6 Frekuensi

Frekuensi merupakan jumlah getaran yang terjadi dalam kurun waktu satu detik (Karyasa, 2011). Atau dapat dikatakan banyaknya gelombang sempurna yang terbentuk dalam satu detik. Frekuensi umumnya dilambangkan dengan huruf "f". Rumus frekuensi merupakan kebalikan dari rumus periode yaitu $f = 1/T$. Sehingga satuannya yaitu satu per detik dimana lebih dikenal dengan sebutan *Hertz* (Hz).

2.9 Satuan Amplitude Vibrasi

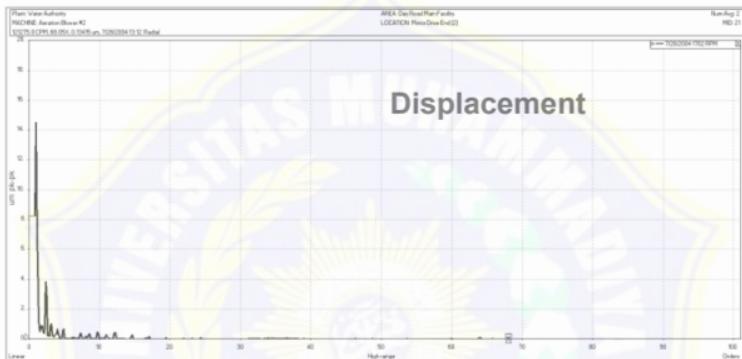
Terdapat tiga satuan *amplitude* vibrasi yang umum digunakan yang mana ketiganya mempunyai keunggulan dan kelemahan masing – masing. Ketiga satuan *amplitude* tersebut yaitu:

2.8.1 Displacement

Displacement menggambarkan seberapa jauh jarak perpindahan sebuah *shaft* dari sumbu rotasinya. Baik perpindahan itu ke atas, ke bawah, ke kiri maupun ke kanan. Pada pelajaran fisika, perpindahan diukur dengan unit satuan meter ataupun kilometer. Namun dalam vibrasi jarak perpindahan ini diukur menggunakan unit *micron meter* ataupun *mils* untuk satuan imperialnya. Dan pada umumnya, *displacement* diukur dalam *amplitude peak to peak*. Karakteristik dari *displacement*:

- a. Cocok digunakan untuk pengukuran pada frekuensi rendah.

- b. Tidak cocok digunakan untuk pengukuran pada frekuensi tinggi.
- c. Cocok digunakan untuk mesin berkecepatan rendah (di bawah 600 rpm).
- d. Cocok digunakan pada mesin yang menggunakan *friction bearing* (*journal* atau *sleeve bearing*).
- e. *Displacement* biasanya digunakan untuk melakukan *balancing*.



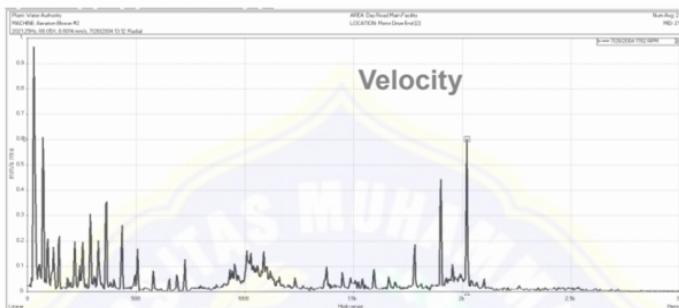
Gambar 2. 3. Pembacaan Spektrum *Displacement*
Sumber: (Mobius Institute, 2014)

2.8.2 Velocity

Velocity merupakan satuan *amplitude* vibrasi yang paling sering digunakan. *Velocity* menggambarkan seberapa cepat perpindahan sebuah *shaft* dari sumbu rotasinya. Atau dapat dikatakan “*The rate of change of displacement*”. *Velocity* diukur dengan menggunakan unit satuan *milimeter per second* (mm/s) atau *in/sec* untuk imperialnya. Dan pada umumnya, *velocity* diukur dalam *amplitude rms*. Karakteristik dari *velocity*:

- a. Cocok digunakan untuk pengukuran pada frekuensi direntang 2 Hz hingga 2.000 Hz.
- b. *Velocity* berbanding lurus dengan *fatigue*.
- c. *Velocity* merupakan penanda tingkatan kerusakan.

- d. Cocok digunakan untuk pengukuran pada bagian mesin yang tidak berputar seperti pada *bearing housing* atau *pedestal*.
- e. *Velocity* biasanya digunakan untuk pengukuran vibrasi rata – rata atau kegiatan *PdM* bulanan.

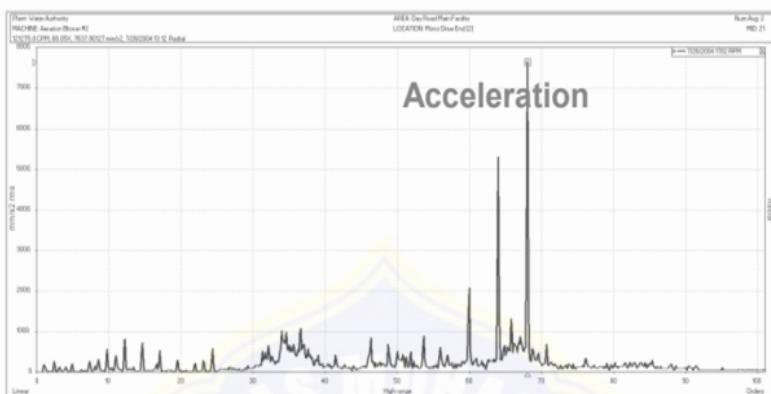


Gambar 2. 4. Pembacaan Spektrum Velocity
Sumber: (Mobius Institute, 2014)

2.8.3 Acceleration

Acceleration menggambarkan seberapa cepat perubahan kecepatan getaran atau dapat dikatakan “*The rate of change of velocity*”. *Acceleration* diukur dengan menggunakan unit satuan *meter per second square* (m/s^2) atau *g's*. Dan pada umumnya, *acceleration* diukur dalam *amplitude rms*. Karakteristik dari *acceleration*:

- a. *Acceleration* sangat sensitif dan cocok digunakan untuk pengukuran pada frekuensi tinggi.
- b. Tidak cocok digunakan pada frekuensi rendah.
- c. Cocok digunakan untuk menganalisa kerusakan pada *bearing* ataupun *gearbox*.



Gambar 2. 5. Pembacaan Spektrum Acceleration
Sumber : (Mobius Institute, 2014)

2.10 Transducer Getaran

Transducer getaran atau *probe* atau yang biasa dikenal dengan nama sensor, dibagi tiga mengikuti satuan *amplitude* daripada vibrasi. Ketiga jenis transducer tersebut yaitu:

2.9.1 Displacement Transducer

Displacement transducer atau *displacement probe* bekerja dengan menggunakan prinsip *eddy current*. Oleh karena itu *displacement transducer* sering disebut sebagai *probe non-contact* dan secara komersial dipasarkan dengan nama *proximity probe*. *Proximity probe* merupakan sensor vibrasi yang digunakan untuk mengukur *displacement*. *Proximity probe* mengukur gerakan relatif antara *shaft* dan ujung sensor. Oleh karenanya, *proximity probe* sangat cocok digunakan pada *friction bearing* dimana sensor langsung di pasang masuk ke dalam *bearing housing* untuk mengukur pergerakan *shaft*. Pada umumnya *proximity probe* dipasang secara permanen di *up half casing* atau *up half bearing housing* dengan cara *threaded mounting* dan membentuk sudut 90° .

Keunggulan *Proximity Probes*: (Mobius Institute, 2014)

- Respon frekuensinya lebar (0 Hz hingga 10.000 Hz)
- Dapat mengukur pergerakan relatif *shaft* terhadap *bearing housing* secara aktual

Kelemahan *Proximity Probes*:

- Tidak cocok di area yang terpapar langsung oleh uap air laut.
- Memerlukan biaya yang mahal.
- Kurang *reliable* jika dipasang di luar *bearing housing*.



Gambar 2. 6. Proximity probes, Cables dan Drivers

Sumber : (Connection Technology Center, 2022)

2.9.2 Velocity Transducer

Velocity transducer biasa disebut dengan *velomitor* dirancang untuk mengukur getaran absolut pada *bearing housing*, *casing* atau pada struktur. *Velomitor* pada umumnya menggunakan prinsip kerja *piezoelectric*. Getaran mesin merambat sehingga memberikan gaya pada keramik *piezoelectric* yang dimana hal ini menghasilkan sinyal yang sebanding dengan gaya tersebut. Kemudian sinyal ini diperkuat dan diintegrasikan sehingga menghasilkan sinyal dengan *noise* rendah yang sebanding dengan *velocity* (Bently Nevada LLC, 2007).



Gambar 2. 7. Velomitor
Sumber: (Bently Nevada, 2020)

2.9.3 Accelerometer

Accelerometer merupakan jenis transduser vibrasi yang secara spesifik dirancang untuk mengukur parameter percepatan pada berbagai komponen mesin industri. Instrumen ini mengadopsi teknologi *Integrated Circuit Piezoelectric* (ICP), sebuah konfigurasi sistem yang memiliki karakteristik unik berupa integrasi unit penguatan sinyal (*amplifier*) secara langsung di dalam struktur fisik sensor tersebut. Salah satu keunggulan signifikan dari penggunaan akselerometer piezoelektrik adalah fleksibilitas dalam pengolahan sinyalnya. Data percepatan yang terekam dapat diolah lebih lanjut melalui metode integrasi matematis untuk menghasilkan parameter kecepatan (*velocity*) maupun simpangan (*displacement*) (Serridge & Licht, 1987). Secara operasional, sensor ini diaplikasikan dengan cara ditempelkan secara mekanis pada bagian *bearing housing* guna menjamin transmisi energi getaran yang presisi. Berkat keandalan dan kapabilitas teknis tersebut, akselerometer saat ini menjadi standar sensor yang paling dominan digunakan dalam perangkat pengumpul data vibrasi portabel untuk keperluan analisis keandalan mesin.

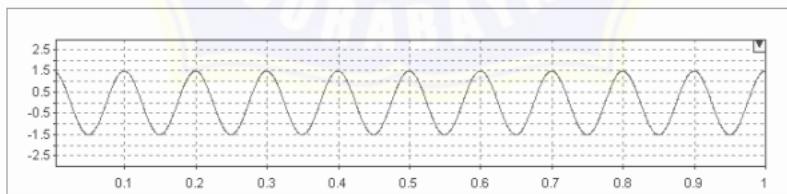


Gambar 2. 8. Accelerometer

Sumber : (Pruftechnik, 2018)

2.11 Time Waveform dan Fast Fourier Transform (FFT)

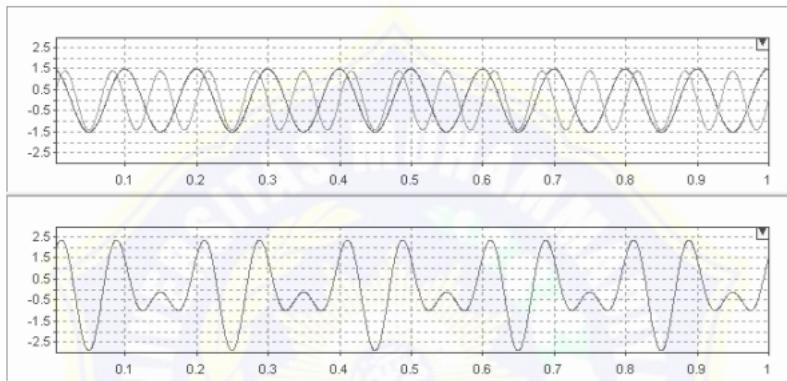
Setiap benda di alam semesta memiliki frekuensi alami tersendiri, sehingga setiap komponen mekanis akan menghasilkan gelombang getaran yang khas. Begitu pula pada sebuah sistem motor dan pompa; saat keduanya beroperasi sebagai satu kesatuan, gelombang getaran dari masing-masing komponen (seperti *bearing*, poros, dan *impeller*) akan saling bercampur dan membentuk satu gelombang kompleks yang disebut dengan *Time Waveform*.



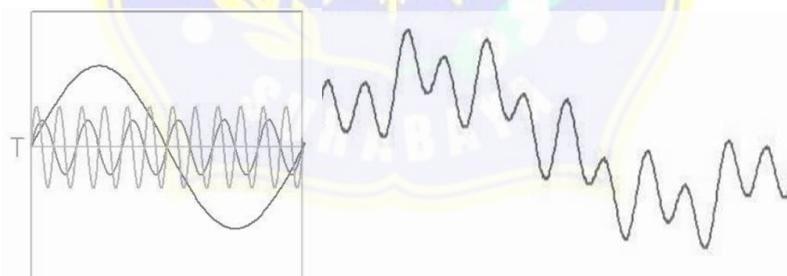
Gambar 2. 9. Satu Gelombang yang Membentuk Sebuah Time Waveform

Sumber : (Mobius Institute, 2014)

Time waveform merupakan getaran asli (*Raw Signal*) yang ditangkap oleh sensor dalam domain waktu. Sinyal ini mengandung seluruh informasi mengenai kondisi mesin, namun sulit untuk diinterpretasikan secara langsung karena sifatnya yang saling tumpang tindih. Oleh karena itu, diperlukan proses dekomposisi sinyal untuk mengurai gelombang kompleks tersebut menjadi komponen frekuensi penyusunnya.



Gambar 2. 10. Dua Gelombang Vibrasi yang Membentuk Sebuah *Time Waveform*
Sumber : (Mobius Institute, 2014)



Gambar 2. 11. Beberapa Gelombang Vibrasi yang Membentuk Sebuah *Time Waveform*
Sumber : (Mobius Institute, 2014)

2.11.1. Landasan Teoritis Harmonic Analysis

Pada awalnya, *fourier transform* ditemukan oleh Jean Baptise Joseph pada tahun 1807. Kemudian pada tahun 1965, Cooley dan Tukey mengembangkan algoritmanya sehingga efektif mempercepat proses *fourier transform* hingga dinamakan *Fast Fourier Transform (FFT)*. Berdasarkan teori (Rao, 2011) dalam bukunya *Mechanical Vibrations*, sinyal getaran pada mesin rotasi dapat dianalisis menggunakan metode *Harmonic Analysis*. Teori ini menyatakan bahwa setiap sinyal periodik yang kompleks dapat direpresentasikan sebagai penjumlahan dari fungsi-fungsi harmonik sederhana, yaitu gelombang kosinus (*cosine*) dan sinus (*sine*).

Secara analitik, model matematis untuk menguraikan *time waveform* $x(t)$ adalah menggunakan deret *fourier* sebagai berikut:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

Dimana:

- a_0, a_n, b_n : Koefisien Fourier yang menunjukkan amplitude getaran
- $n\omega$: Frekuensi harmonic ke-n
- t : waktu (detik)

2.11.2. Transformasi Sinyal ke Digital (FFT)

Meskipun secara teoritis getaran bersifat kontinu, alat ukur vibrasi modern menangkap data dalam bentuk diskrit (titik - titik sampel). Oleh karena itu, diperlukan jembatan antara teori harmonik kontinu dengan pemrosesan data digital. Proses ini dilakukan menggunakan *Discrete Fourier Transform (DFT)* yang dihitung melalui algoritma *Fast Fourier Transform (FFT)*.

Model matematis FFT untuk mengubah sampel data domain waktu $x(n)$ menjadi spektrum frekuensi $X(k)$ adalah:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

Dimana:

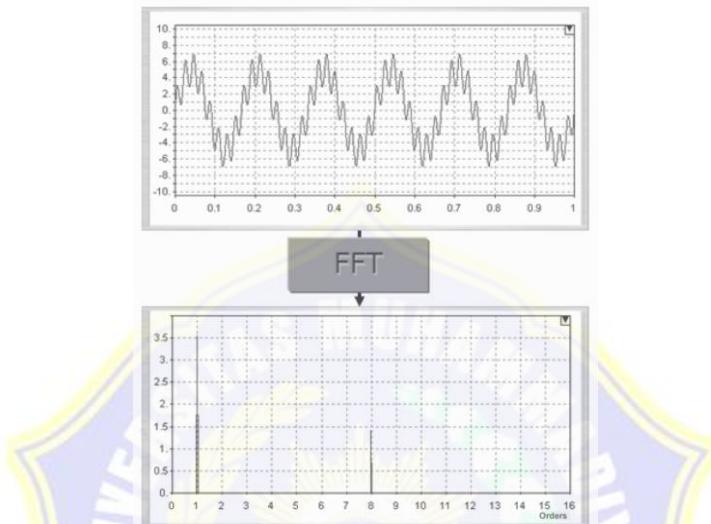
- $X[k]$: Komponen sinyal dalam domain frekuensi
(Spectrum)
 $x[n]$: Sampel sinyal vibrasi dalam domain waktu
(Time Waveform).
 N : Jumlah total sampel data.
 $e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$: Inti transformasi yang menghubungkan waktu
 dan frekuensi.

Komponen eksponensial di atas $e^{-j\theta}$ dapat diuraikan menjadi $(\cos \theta - j \sin \theta)$. Hal ini membuktikan bahwa sumber (source) utama dari algoritma FFT adalah tetap gelombang sinusoidal (Cosine dan Sine), di mana FFT bekerja dengan mencari korelasi antara sinyal mentah mesin dengan gelombang dasar tersebut pada berbagai tingkat frekuensi (Randall, 2021).

2.11.3. Interpretasi Spektrum Frekuensi

Time waveform sangat sulit untuk dipahami, hanya orang dengan pengetahuan dan pengalaman tinggi yang dapat menggunakannya untuk analisa vibrasi. Namun dengan menggunakan metode *FFT*, *raw signal* atau *time waveform* yang sangat kompleks tersebut dapat diubah ke domain frekuensi yang lebih mudah untuk dipahami dan dianalisa. Domain frekuensi ini dinamakan dengan *spectrum* (Alfita et al., 2024). Hasil dari proses *FFT* adalah sebuah spektrum frekuensi yang menampilkan puncak-puncak (*peaks*) pada frekuensi tertentu. Dalam analisis vibrasi motor dan pompa, spektrum ini memungkinkan

teknisi untuk mengidentifikasi sumber kerusakan secara spesifik:

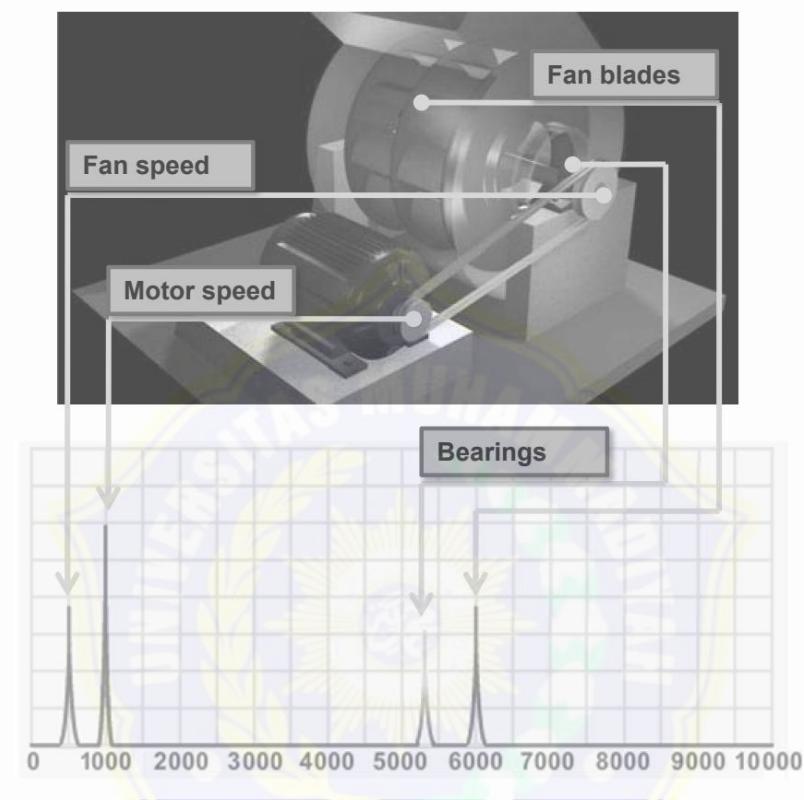


Gambar 2. 12. Proses *FFT* Memisahkan *Complex Waveform* Menjadi *Individual Spectrum* pada *Domain Frekuensi*

Sumber : (Mobius Institute, 2014)

2.12 Vibration FFT Spectrum

Vibration FFT Spectrum atau yang lebih familiar dikenal dengan nama spektrum saja, merupakan hasil *FFT* dari *time waveform*. *Spectrum FFT* merupakan data yang sangat berguna untuk analisa vibrasi. Jika terdapat masalah pada mesin, *spectrum FFT* memberikan informasi untuk membantu menentukan sumber dan penyebab masalah (Mais, 2002). *Spectrum* menampakkan frekuensi masing-masing dari setiap komponen mesin pada domain frekuensi. Oleh karenanya, sangat perlu diketahui data – data mesin agar analis dapat mengetahui frekuensi spektrumnya.



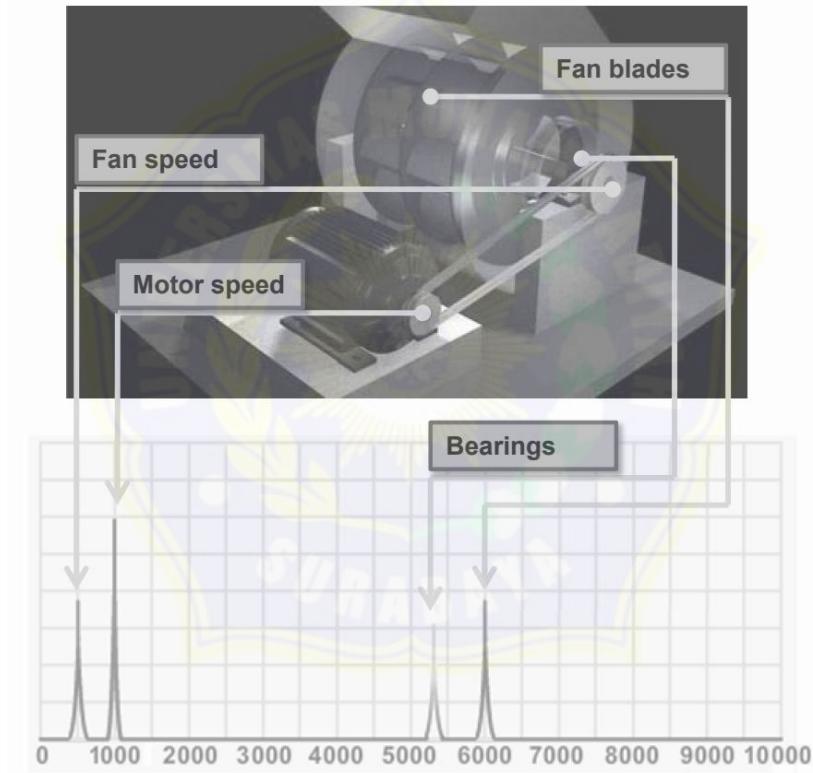
Gambar 2. 13. Frekuensi Vibrasi dari Masing - Masing Komponen Mesin

Sumber : (Mobius Institute, 2014)

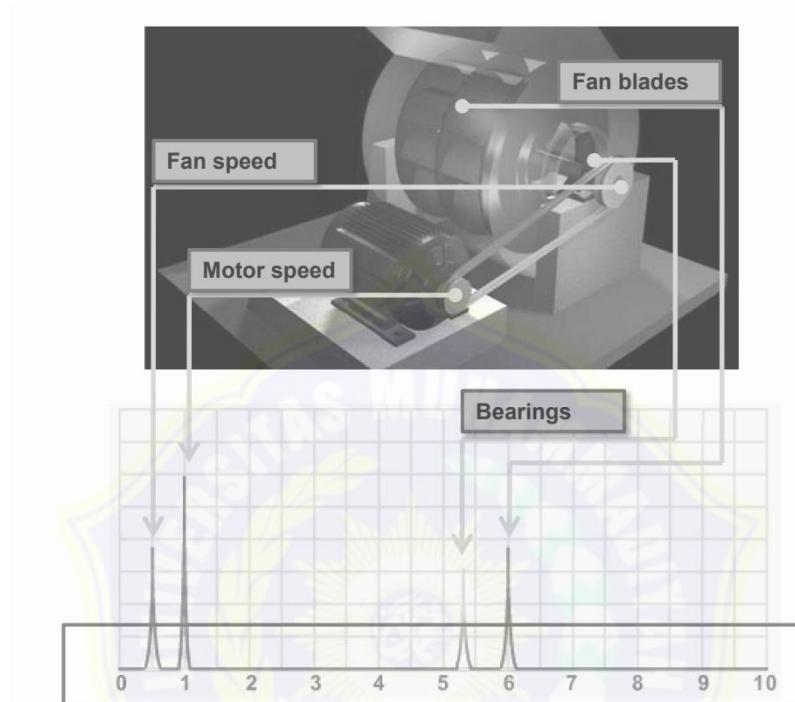
2.13 Order

Dalam konteks analisis getaran mesin, istilah *order* merujuk pada representasi frekuensi yang didefinisikan sebagai kelipatan dari kecepatan rotasi operasional poros. Implementasi parameter *order* dalam analisis vibrasi merupakan langkah strategis guna memfasilitasi standarisasi komunikasi teknis di antara para analis *Condition Based Maintenance (CBM)*. Penggunaan skala ini terbukti memudahkan para teknisi dalam beradaptasi serta memahami

dinamika spektrum getaran secara lebih intuitif. Secara universal, besaran *order* dinotasikan menggunakan simbol huruf "X", di mana satu kali kecepatan rotasi mesin diidentifikasi sebagai frekuensi fundamental atau 1X. Secara matematis, nilai 1X tersebut diperoleh melalui konversi kecepatan putar mesin dalam satuan *revolutions per minute (RPM)* yang jika diubah dalam satuan per detik maka dibagi dengan 60 untuk menghasilkan satuan Hertz.



Gambar 2. 12. FFT Spectrum dalam CPM
Sumber : (Mobius Institute, 2014)



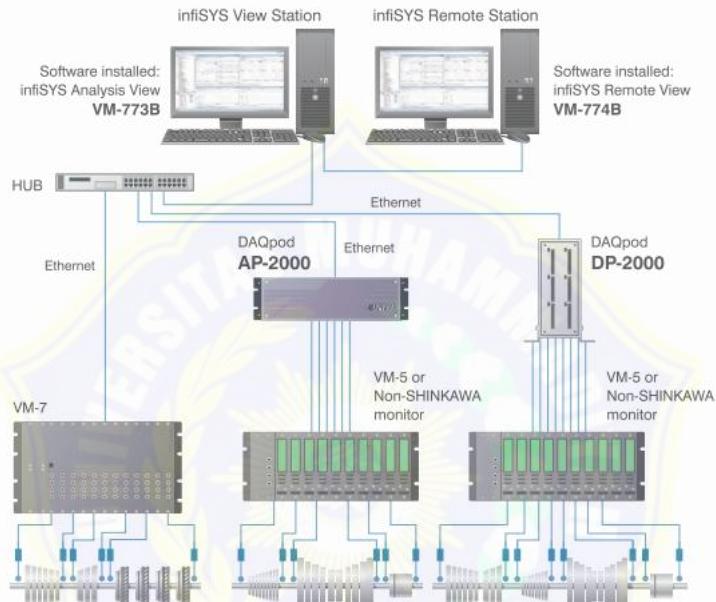
Gambar 2. 13. FFT Spectrum dalam Order
Sumber : (Mobius Institute, 2014)

2.14 Metode Pengambilan Data

2.14.1 Vibration Monitoring System (VMS)

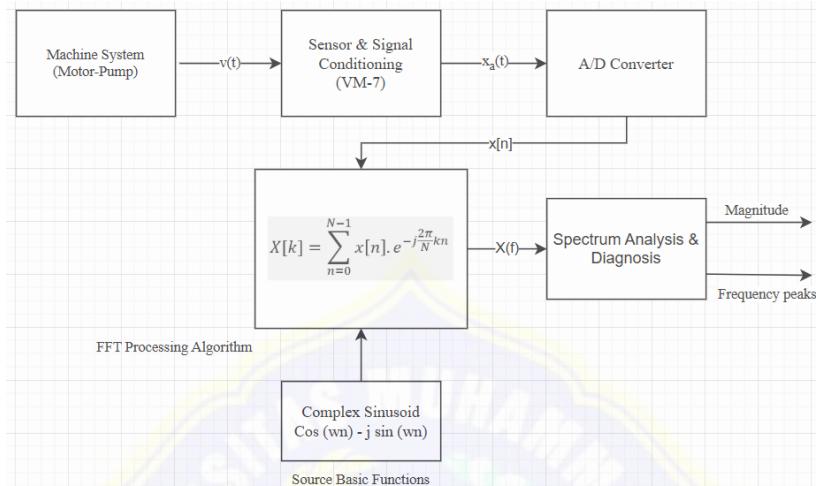
Pengambilan data menggunakan VMS yaitu dengan cara memasang sensor secara permanen pada poin – poin vibrasi yang telah ditentukan pada mesin tertentu. Data vibrasi diambil secara kontinyu oleh VMS dan kemudian data vibrasi tersebut dikirim ke *Vibration Data Processing Module (VDPM)* untuk diproses. Dari VDPM data vibrasi yang telah diproses di salurkan ke enterprise sehingga setiap orang yang mempunyai akses dapat melihat datanya. Data vibrasi yang dapat dilihat di enterprise diantaranya yaitu, *overall vibrasi, spectrum, time*

waveform, dan banyak lainnya. Pada umumnya *probe* yang sering berkolaborasi dengan VMS yaitu *proximity probe*. Namun, sekarang juga banyak *velomitor* ataupun *accelerometer* yang digunakan dengan VMS.



Gambar 2. 14. Pengambilan Data Menggunakan VMS
Sumber : (Shinkawa Electric Co., 2023)

Jika gambar di atas digambarkan dalam diagram blok, hasil dari pengambilan data menggunakan vibration monitoring system, kurang lebihnya seperti pada gambar yang ditunjukkan di bawah ini.



Gambar 2. 15. Blok Diagram Vibration Monitoring System

2.14.2 Portable Data Analyzer

Portable data analyzer merupakan perangkat *portable* yang digunakan untuk mengukur dan merekam data vibrasi secara *offline*. Pada umumnya, *portable data analyzer* menggunakan sensor *accelerometer*. Data vibrasi diambil secara langsung menyesuaikan dengan jadwal *PdM* yang telah ditentukan. Data yang telah diambil kemudian di *upload* ke software bawaan dari *portable data analyzer* untuk *trending* dan memudahkan analisa. Keunggulan *portable data analyzer*:

- Dapat digunakan untuk mengukur vibrasi pada frekuensi tinggi.
- Dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan dini pada *antifriction bearing* dan *gearbox*.
- Dapat digunakan untuk melakukan *balancing*.
- Dapat digunakan untuk mencari *natural frequency equipment*.
- Dapat digunakan untuk mengecek *soft foot*.

2.15 Pengukuran Getaran

Pengukuran getaran mesin dilakukan pada sisi luar dan sisi dalam daripada *driver* dan juga *drivennya*. Dan pada setiap sisi, dilakukan pengukuran pada tiga titik yaitu *vertical*, *horizontal*, dan *axial*. Pada umumnya, sisi luar disebut *outboard* (*OB*) atau *non-drive end* (*NDE*). Sedangkan untuk sisi dalam disebut *inboard* (*IB*) atau *Drive End* (*DE*).

Untuk pengukuran pada mesin yang dipasang secara vertikal seringkali terdapat perbedaan pendapat mengenai titik vertikalnya. Menurut (Mobius Institute, 2014), pada mesin yang dipasang secara vertikal, titik pengukuran untuk arah vertikal sebaiknya pada titik yang sejajar dengan *suction* ataupun *discharge* pompa. Hal ini dapat dipahami dikarenakan pada arah tersebut prinsipnya hampir sama dengan mesin yang dipasang secara *horizontal*, yaitu terdapat *anchor bolt* yang menguatkan arah *vertical*.

Pengukuran menggunakan *proximity probe* harus menyesuaikan jarak *probe* terhadap *shaft*. Sedangkan pengukuran menggunakan *velomitor* ataupun *accelerometer* harus dilakukan sedekat mungkin terhadap sumber getaran. Pada umumnya dilakukan pada *bearing housing* atau *pedestal*.

2.16 Macam Kerusakan Pada *Rotating Machines*

Dengan analisa vibrasi, banyak kerusakan pada *rotating machine* yang dapat terdeteksi diantaranya yaitu *unbalance*, *misalignment*, *looseness*, *resonance*, *cavitation*, *oil whirl*, *blade/vane faults*, dan lain sebagainya yang mana tidak semuanya dapat dibahas disini.

2.17 *Unbalance*

Unbalance selalu ada pada semua *rotating machine* (Bently & Hatch, 2002). Hal tersebut tentu saja benar dikarenakan, pada setiap penciptaan *shaft* oleh manusia, tidak mungkin distribusi pembebanannya sama sepanjang *shaft* tersebut. Oleh karenanya, yang dikatakan *unbalance failure* yaitu keadaan dimana keseimbangan *rotating machine* terganggu dikarenakan lebih berat ke salah satu sisi dan

menghasilkan vibrasi yang melebihi limit. *Unbalance* pada umumnya terjadi dengan munculnya frekuensi yang dominan pada 1X rpm.

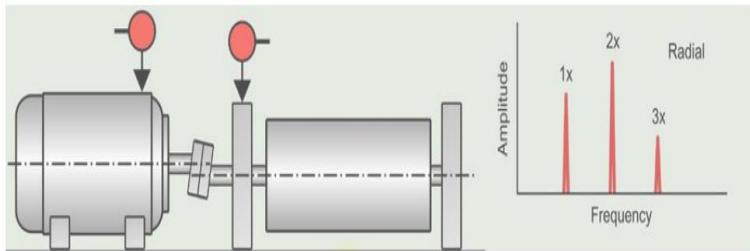
Unbalance dibagi menjadi empat tipe dasar yaitu *static unbalance*, *couple unbalance*, *quasi-static unbalance* dan *dynamic unbalance* (McMillan, 2004).

2.18 Misalignment

Misalignment adalah kondisi dimana garis sumbu mesin penggerak (*driver*) yang tidak sejajar dengan garis sumbu mesin yang digerakkan (*driven*). *Misalignment* merupakan salah satu penyebab kegagalan mesin yang paling sering ditemukan. Jika terjadi *misalignment* pada sebuah *machine train*, maka umur daripada *seal*, *coupling* dan *bearing* akan lebih pendek. Dan jika keadaan *misalignment* dibiarkan terlalu lama, akan menyebabkan rusaknya *shaft* bahkan *impeller/vane/gear*. Pada dasarnya terdapat dua jenis *misalignment* yaitu *parallel misalignment* dan *angular misalignment* (Salman, 2025).

2.18.1 Parallel Misalignment

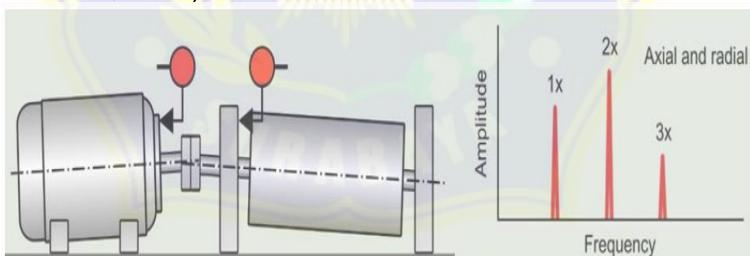
Parallel misalignment atau *offset misalignment* yaitu ketidak lurusan antara garis sumbu *driver* dan garis sumbu *driven*, namun kedua garis sumbu tersebut sejajar. *Paralel misalignment* dapat terjadi secara vertikal dimana bisa disebabkan oleh ketinggian kaki – kaki yang tidak sesuai. Juga bisa terjadi secara horizontal dimana hal ini bisa disebabkan dikarenakan *jack bolt* samping tidak digunakan dengan baik saat proses *alignment*. Selain kedua hal tersebut masih banyak penyebab lainnya yang dapat menyebabkan *machine train* menjadi *misalignment*. *Parallel misalignment* umumnya memunculkan 1X dan 2X rpm (Bently & Hatch, 2002).



Gambar 2. 16. Parallel Misalignment dan Spektrumnya
Sumber : (Salman, 2025)

2.18.2 Angular Misalignment

Angular misalignment yaitu ketidaksejajaran dan ketidak lurusan antara garis sumbu *driver* dan garis sumbu *driven*. Hal ini menyebabkan antar permukaan *coupling* tidak bertemu sempurna sehingga membentuk sudut. Terbentuknya sudut ini tentunya mengakibatkan terciptanya celah diantara permukaan *coupling* sehingga menimbulkan gaya aksial. *Angular misalignment* menghasilkan vibrasi yang kuat pada 1X dan sebagian pada 2X pada arah axial pada kedua bearing-nya (Mobius Institute, 2015).



Gambar 2. 17. Angular Misalignment dan Spektrumnya
Sumber : (Salman, 2025)

2.19 *Looseness*

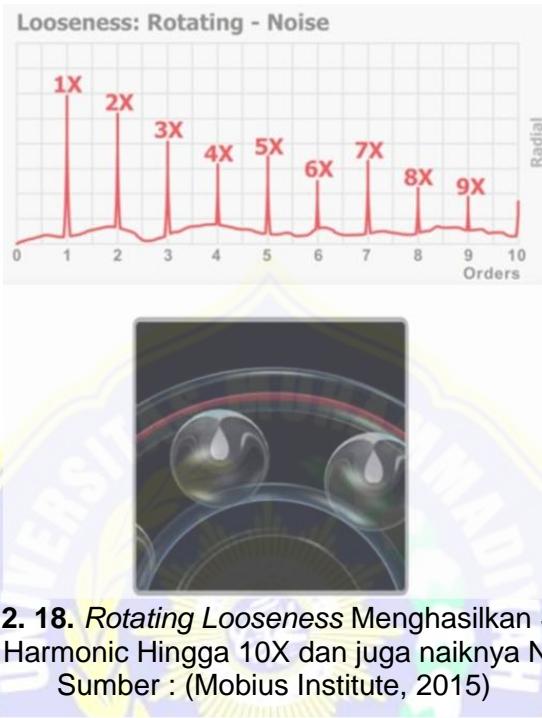
Berdasarkan klasifikasi yang dikemukakan oleh (Mobius Institute, 2015), fenomena kelonggaran mekanis ataupun yang biasa disebut dengan *looseness* secara praktis terbagi menjadi tiga kategori utama yang memerlukan perhatian mendalam dalam analisis vibrasi. Ketiga jenis tersebut meliputi *rotating looseness*, *structural looseness*, dan *non-rotating looseness*. Pemahaman komprehensif terhadap karakteristik masing-masing tipe sangat krusial guna mengidentifikasi sumber gangguan mekanis serta menentukan langkah mitigasi yang tepat dalam menjaga keandalan operasional komponen mesin secara berkelanjutan.

2.19.1 *Rotating Looseness*

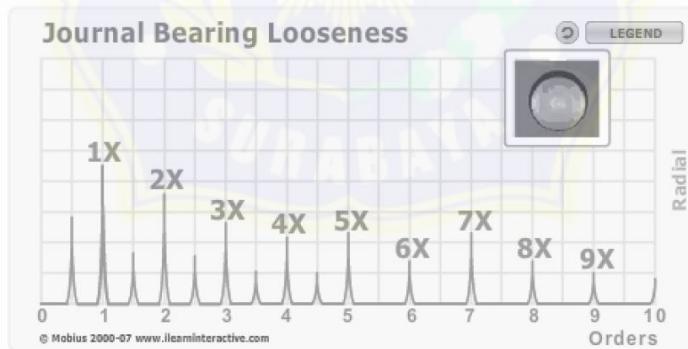
Looseness yang diakibatkan bearing yang telah *failed* disebut sebagai *mechanical looseness* atau *rotating looseness*. Kelonggaran rakitan internal biasanya disebabkan oleh ketidaksesuaian antara komponen – komponen *bearing* yang menghasilkan banyak harmonik di *FFT* karena respon *non-linier* dari bagian – bagian yang kendur terhadap gaya eksitasi dari rotor (Salman, 2025).

Pada *antifriction bearing* yang telah rusak parah, *rotating looseness* akan memunculkan *spectrum* 1X yang *harmonic* hingga 10X bahkan bisa lebih hampir sama dengan *spectrum misalignment* yang parah. Hal ini dapat membingungkan jika dibandingkan dengan *severe misalignment* hanya saja pada *spectrum rotating looseness* terdapat indikasi tambahan yaitu naiknya *amplitude noise floor*.

Spectrum frekuensi *rotating looseness* yang ditunjukkan oleh *friction bearing* atau *journal bearing* hampir sama dengan *anti friction bearing* yaitu terdapat *harmonic 1X rpm* hingga 10X atau lebih, namun sedikit berbeda. Cela yang berlebihan pada *journal bearing* dapat menghasilkan *harmonic* dari 0.5X.



Gambar 2. 18. *Rotating Looseness* Menghasilkan Spectrum FFT yang Harmonic Hingga 10X dan juga naiknya Noise Floor
Sumber : (Mobius Institute, 2015)



Gambar 2. 19. *Rotating Looseness* pada *Journal Bearing* Menghasilkan Spectrum FFT yang Harmonic Hingga 10X dan juga naiknya terdapat 0.5X
Sumber : (Mobius Institute, 2015)

2.19.2 Structural Looseness

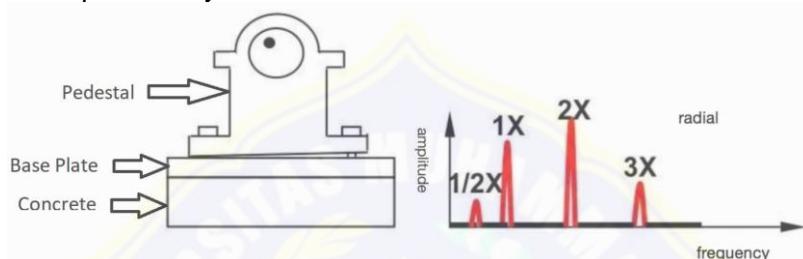
Structural looseness adalah pergerakan yang terjadi pada bagian peyangga mesin yang disebabkan oleh lemahnya basis internal daripada dudukan mesin, *base plates*, beton pondasi, dan permukaan dalam *grouting*. Contohnya seperti *baseplate* yang telah berkarat, keretakan pada beton pondasi, *grouting* yang mengalami *porosity*, posisi penguat yang tidak tepat atau memang kurang kuat dan lain semacamnya. *Structural looseness* antara mesin dan pondasinya akan meningkatkan 1X komponen vibrasi pada arah bagian yang paling lemah. Pada umumnya, pada mesin yang dipasang secara horizontal, *structural looseness* terjadi pada arah horizontal dimana pada arah tersebut tidak terdapat *anchor bolt* sebagai penguat. Sedangkan untuk mesin yang dipasang secara *vertical*, sebuah mesin dinyatakan mengalami *structural looseness* jika vibrasi terjadi lebih besar di arah 90 derajat dari *suction* atau *discharge* pompa.

Karena kemunculan frekuensi *structural looseness* sama dengan *unbalance* yaitu di 1X rpm, tentu hal ini dapat membingungkan. Menurut (Mobius Institute, 2015) untuk menentukan mesin tersebut mengalami *structural looseness* atau *unbalance* ada beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu:

- a. Jika amplitudo 1X putaran mesin pada arah horizontal lebih besar 2 kali lipat atau lebih daripada amplitudo 1X putaran mesin pada arah vertikal, maka hal tersebut mengindikasikan terjadinya *structural looseness*.
- b. Jika amplitudo 1X putaran mesin pada arah horizontal lebih kecil atau sama dengan amplitudo 1X putaran mesin pada arah vertikal, maka hal tersebut mengindikasikan terjadinya *unbalance*.

2.19.3 Non-Rotating Looseness

Looseness antara dua bagian yang diam seperti kaki – kaki mesin terhadap pondasi atau rumah *bearing* terhadap mesin (Mobius Institute, 2015). *Non-rotating looseness* memunculkan *harmonic* 1X tetapi seringnya tidak lebih dari 3X dan juga muncul 0.5X pada spektrumnya.



Gambar 2. 20. Non-Rotating Looseness Anchor Bolt yang Kurang Kencang dan Spectrum FFT-nya

Sumber : (Salman, 2025)

2.20 Resonance

Setiap benda di dunia ini memiliki *natural* frekuensinya tersendiri. Saat benda – benda tersebut dirakit menjadi satu kesatuan (dalam pembahasan kita merupakan *machine train*) maka akan terbentuk *natural* frekuensi yang baru. Jika *natural* frekuensi sebuah mesin A mendekati atau sama dengan frekuensi putaran mesin tersebut atau terdapat mesin lain disekitarnya yang sedang beroperasi dan memiliki frekuensi putaran mesin yang mendekati atau sama dengan *natural* frekuensi mesin A, maka akan menciptakan getaran yang besar. Hal inilah yang dinamakan resonansi (Napitupulu et al., 2022). Resonansi dapat meningkatkan amplitude vibrasi, peningkatan vibrasi yang terukur dapat menjadi 3 kali lebih besar bahkan bisa mencapai hingga 50 kali lebih besar daripada vibrasi normalnya. Oleh karenanya, pengoperasian mesin di sekitar *natural* frekuensi harus benar – benar dihindari. Pengoperasian yang baik untuk menghindari resonansi yaitu harus menjauh 15% sampai 20% dari *natural* frekuensi.



Gambar 2. 21. Spektrum dari Resonansi

Sumber : (Mobius Institute, 2015)

2.21 Cavitation

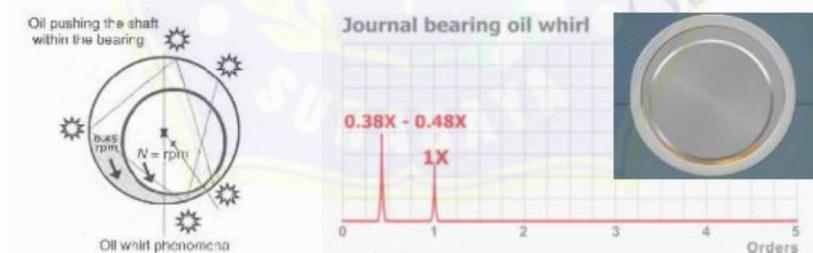
Kavitasasi pada pompa terjadi akibat penurunan tekanan statis di area *suction* yang mana bisa disebabkan oleh *valve* yang tidak terbuka seluruhnya ataupun *NPSH* yang memang kurang. Secara auditoris, kavitasasi menghasilkan suara yang serupa dengan turbulensi bebatuan atau kerikil (*gravel*) yang mengalir di dalam casing pompa. Dalam domain analisis spektrum, kavitasasi tidak menampakkan diri sebagai puncak diskrit tunggal, melainkan sebagai energi *broadband* atau frekuensi acak pada rentang frekuensi tinggi. Merujuk pada studi (Salman, 2025), energi vibrasi ini umumnya muncul secara bertumpuk dengan frekuensi *vane pass* (VP) beserta deret harmoniknya. Indikator teknis yang paling signifikan adalah munculnya *noise floor* di dasar spektrum yang membentuk pola menyerupai gundukan energi. Kenaikan *noise floor* yang membentang dari frekuensi *vane pass* hingga ke area frekuensi tinggi ini menjadi parameter kritis dalam mendiagnosa kavitasasi, sekaligus membedakannya dari anomali mekanis lain seperti ketidakseimbangan (*unbalance*) atau resonansi.



Gambar 2. 22. Spectrum dari Kavitasasi
Sumber : (Mobius Institute, 2015)

2.22 Oil Whirl

Oil whirl terjadi saat putaran mesin menekan lapisan pelumas ke depan daripada shaft mesin di dalam *plain journal bearing* (Taylor, 2003). *Oil whirl* biasanya terjadi pada frekuensi *sub-synchronous*. Karakteristik *oil whirl* pada umumnya yaitu meningkatnya spektrum vibrasi *sub-synchronous* di rentang $0.38X$ hingga $0.48X$.

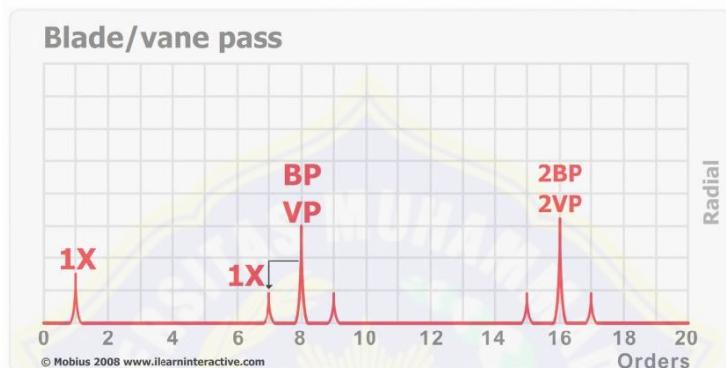


Gambar 2. 23. Spectrum dari Oil Whirl
Sumber : (Salman, 2025)

2.23 Blades/Vanes Fault

Blades/vanes fault yaitu kerusakan yang terjadi pada *impeller* pompa ataupun kipas pada *blower* ataupun motor. Jumlah bilah akan mengikuti putaran daripada *shaft*. Oleh

karenanya pada *spectrum* frekuensi, *blades/vanes pass frequency* adalah jumlah bilah dikalikan dengan frekuensi putaran mesin. Jika *amplitude* pada *blades/vanes* meningkat signifikan, hal tersebut mengindikasikan terdapat masalah internal seperti pengikisan pada *impeller*.



Gambar 2. 24. Blade/Vane Pass Frequency
Sumber : (Mobius Institute, 2015)

2.24 Batasan Vibrasi

Ada beberapa acuan yang bisa dijadikan batasan vibrasi. Pada umumnya, batasan vibrasi yang paling utama untuk digunakan adalah batasan vibrasi yang dikeluarkan oleh pabrikan pembuat mesin. Batasan yang kedua yaitu batasan vibrasi yang mengacu pada standar yang dikeluarkan oleh ISO. Dan yang terakhir batasan berdasarkan pengalaman.

Standar ISO 20816 yang merupakan pembaruan dari seri ISO 10816 dan ISO 7919 disusun sebagai pedoman untuk menilai vibrasi pada mesin industri secara komprehensif (Mobius Institute, 2015). Standar terbaru ini mengatur kriteria vibrasi baik pada struktur diam (non-rotating) menggunakan velomitor ataupun accelerometer, maupun vibrasi pada poros (rotating) menggunakan proximity probe.

