

2. TINJAUAN PUSTAKA

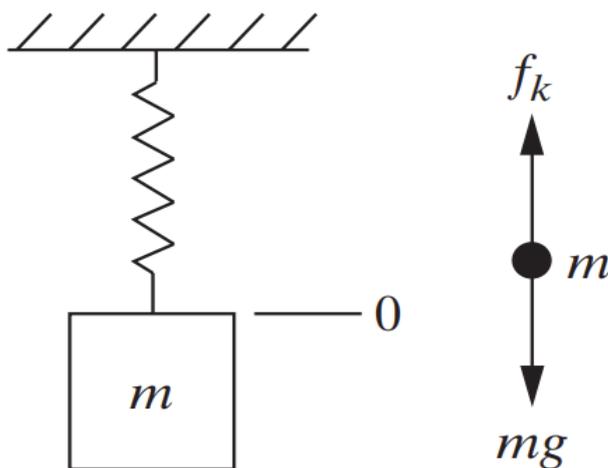
2.1 Perawatan (*Maintenance*)

Perawatan atau *maintenance* dalam dunia industri merupakan salah satu tindakan yang dilakukan dengan tujuan untuk merawat mesin atau alat yang digunakan. Perawatan ini bertujuan untuk menghindari terjadinya kerusakan mesin atau alat saat waktu pemakaian. Kerusakan saat waktu pemakaian dapat menyebabkan kerugian yang cukup besar dalam dunia industri karena dengan rusaknya alat atau mesin, proses yang berlangsung dalam industri tentunya akan terhenti dan tidak bisa dilanjutkan. Kejadian seperti ini biasa disebut dengan *downtime*. *Preventive maintenance* merupakan strategi perawatan dengan cara melakukan pengecekan pada komponen-komponen mesin secara berkala. Dengan strategi tersebut kondisi setiap komponen akan lebih mudah untuk diketahui setiap kali melakukan pengecekan sehingga komponen yang akan rusak atau sudah rusak dapat terdeteksi lebih mudah. Selain itu hal ini tentu akan mengurangi *downtime* yang terjadi pada mesin karena jadwal pengecekan komponen mesin dapat dijadwalkan diluar waktu pemakaian mesin. *Preventive maintenance* menyaratkan penjadwalan penghentian mesin secara teratur meskipun tidak diperlukan, hal ini meningkatkan biaya pemeliharaan karena beberapa komponen mesin diganti, padahal penggantian tersebut tidak diperlukan (Popescu, *et al.*, 2021). Selain itu terdapat juga risiko terjadinya *human error* dimana pengecekan yang dilakukan oleh manusia hanya menggunakan indra manusia saja sehingga kurang akurat. Bisa saja komponen mesin belum mengalami kerusakan tetapi akibat adanya *human error* komponen tersebut pun diganti. Hal ini tentunya akan menimbulkan pemborosan karena *lifetime* komponen dari mesin tidak dipakai sepenuhnya. Strategi ini juga kurang cocok diterapkan pada mesin yang berjalan secara terus-menerus ataupun mesin yang penting dimana penghentian mesin dapat menimbulkan kerugian yang besar bagi industri, sedangkan strategi ini memerlukan penghentian mesin untuk melakukan pengecekan secara berkala.

Condition-based maintenance merupakan strategi perawatan yang dilakukan dengan cara memonitor komponen-komponen yang ada pada mesin secara langsung tanpa melakukan penghentian mesin. Proses pemantauan komponen yang ada pada mesin dilakukan dengan bantuan sensor yang terpasang pada mesin. Sensor tersebut nantinya akan mengukur variabel yang dimonitor dan dikirimkan ke sebuah *controller* untuk diolah dan ditampilkan sebagai data pada perangkat keras seperti komputer, laptop, *handphone*, dan tablet. *Condition-based*

maintenance merupakan strategi perawatan yang dapat memantau kondisi komponen-komponen mesin secara *real time* dan akurat melalui pengukuran sensor yang terpasang pada mesin sehingga terjadinya *human error* dapat dikurangi dalam strategi perawatan ini. Selain itu, pengecekan kondisi komponen bisa dilakukan tanpa menghentikan mesin. Hal ini tentunya akan menghemat biaya perawatan dimana pada strategi perawatan ini tidak membutuhkan banyak pekerja atau teknisi untuk turun ke lapangan secara terus menerus untuk melakukan pengecekan. Salah satu contoh dari *Condition-based maintenance* adalah melakukan *monitoring* dan analisa getaran yang ada pada mesin. Analisa getaran adalah alat dasar untuk *condition monitoring* (KiranKumar, *et al.*, 2018). Kelemahan dari strategi perawatan ini adalah biaya investasi yang cukup besar. Biaya sensor, *controller*, dan pemasangan alat untuk menerapkan *Condition-based maintenance* tidaklah murah bagi industri. Selain itu, untuk menerapkan *Condition-based maintenance* dibutuhkan SDM yang cukup tinggi untuk dapat mengerti dengan baik variabel apa saja yang dimonitor untuk memantau kondisi mesin. Kedua hal ini tentunya menjadi alasan utama industri belum menerapkan strategi perawatan ini khususnya di negara berkembang seperti Indonesia.

2.2 Getaran



Gambar 2.1 *Spring-mass free body diagram*.

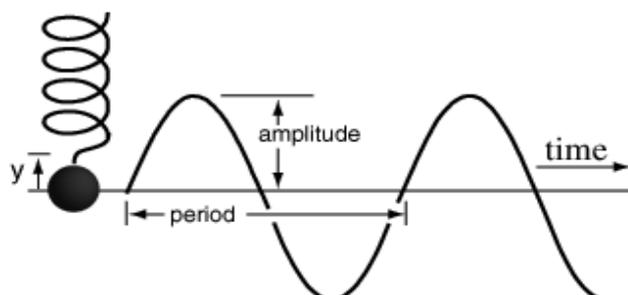
Sumber: Inman, D. J. (2014) *Engineering vibration* (4th ed.). Pearson. P. 5.

Getaran merupakan sebuah gerak bolak-balik yang terjadi pada suatu sistem yang memiliki kesetimbangan (sistem akan tetap diam jika tidak menerima gaya). Hal yang paling mudah untuk membayangkan suatu sistem getaran adalah dengan membayangkan mekanisme kerja pegas pada kendaraan. Gambar 2.1 merupakan gambaran sederhana bagaimana getaran

dapat terjadi pada sebuah sistem pegas-massa. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa terdapat sebuah pegas yang salah satu ujungnya terkait pada suatu beban dan ujung lainnya terkait pada sebuah sambungan tetap. Jika sistem pada gambar 2.1 merupakan sistem yang tidak memiliki gesekan, maka sistem tersebut akan bergerak bolak-balik dari atas ke bawah secara terus menerus. Gerakan bolak-balik ini akan menggambarkan sebuah grafik trigonometri jika digambarkan pada sebuah koordinat kartesius dimana sumbu X merupakan waktu dan sumbu Y merupakan simpangan seperti pada gambar 2.2.

Gerakan bolak-balik secara terus menerus seperti ini umumnya tidak dapat direalisasikan di dunia nyata karena pada dunia nyata setiap sistem akan memiliki hambatan gesek. Hambatan gesek inilah yang nantinya berfungsi untuk meredam getaran yang terjadi sehingga sistem yang tadinya bergerak akibat gaya akan kembali diam seperti sebelum terkena gaya. Pada sebuah mesin, jenis getaran dapat menentukan gerakan apa saja yang terjadi pada mesin tersebut. Dengan melakukan analisa getaran pada suatu mesin, getaran-getaran yang tidak diinginkan pada mesin tersebut dapat diketahui. Hal ini sangat penting untuk dilakukan karena dapat membantu teknisi dalam mengetahui adanya kondisi abnormal pada mesin.

Dalam dunia nyata getaran dapat memiliki dua efek yang saling bertentangan. Getaran yang berlebihan tentunya akan berpengaruh terhadap performa maupun umur kekuatan dari suatu komponen yang ada (Rachman, *et al.*, 2018). Getaran seperti inilah yang harus diperhatikan karena dapat menyebabkan kerugian. Tetapi terdapat juga getaran yang sengaja dibuat untuk keperluan operasional mesin tersebut, contohnya adalah mesin pengayak tepung yang memerlukan getaran untuk melakukan pengayakan tepung. Getaran yang dibuat secara sengaja seperti ini tentu sudah dipertimbangkan dalam perancangan agar getaran yang diciptakan tidak sampai merusak komponen-komponen dari mesin tersebut.



Gambar 2.2 Grafik getaran dari *Spring-mass system*.

Sumber: Rag. (2017). *Simple harmonic motion*. iSoul. <https://www.isoul.org/simple-harmonic-motion/>

2.3 Karakteristik Getaran

Suatu getaran akan menghasilkan sebuah grafik gelombang trigonometri. Gelombang ini memiliki banyak informasi untuk dianalisa. Informasi yang terdapat pada gelombang ini sangat berguna untuk menentukan sifat dari getaran tersebut. Hal ini sangat penting dalam menemukan getaran yang tidak seharusnya berada pada suatu mesin. Getaran yang tidak seharusnya tercipta pada mesin serta melewati batas getaran yang dapat diterima oleh mesin akan membuat komponen mesin yang dipakai menjadi tidak awet. Persamaan umum sebuah gelombang getaran dapat dituliskan seperti berikut (Inman, 2014).

$$x(t) = A\sin(\omega_n t + \phi) \quad (2.1)$$

dimana $x(t)$ merupakan simpangan (*displacement*), A merupakan amplitudo, ω_n merupakan frekuensi natural, t merupakan waktu, dan ϕ merupakan fase. Persamaan 2.1 dapat diturunkan untuk menemukan kecepatan dari sebuah grafik getaran. Kecepatan pada grafik getaran merupakan kecepatan perubahan simpangan $x(t)$. Dengan menurunkan persamaan 2.1, maka akan didapatkan persamaan grafik kecepatan suatu getaran sebagai berikut (Inman, 2014).

$$\dot{x}(t) = \omega_n A \cos(\omega_n t + \phi) \quad (2.2)$$

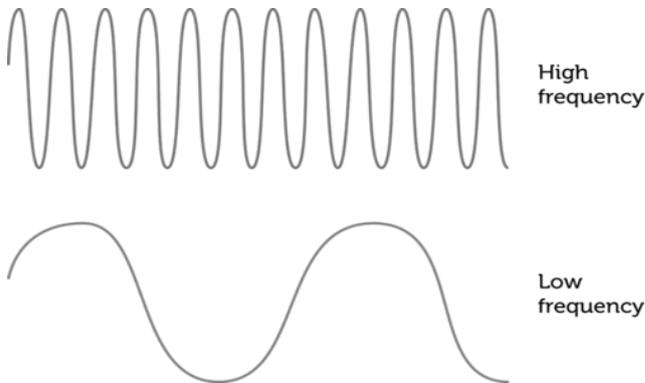
dimana $\dot{x}(t)$ merupakan kecepatan getaran. Persamaan 2.2 dapat diturunkan lagi untuk menemukan percepatan suatu getaran. Percepatan getaran merupakan pertambahan kecepatan yang terdapat pada getaran. Dengan menurunkan persamaan 2.2, maka akan didapatkan persamaan grafik percepatan suatu getaran sebagai berikut (Inman, 2014).

$$\ddot{x}(t) = -\omega_n^2 A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (2.3)$$

dimana $\ddot{x}(t)$ merupakan percepatan getaran. Gelombang yang dihasilkan oleh getaran memiliki beberapa karakteristik. Karakteristik tersebut adalah frekuensi, amplitudo, dan fase. Karakteristik tersebut sangat berguna dalam menentukan sifat dari getaran yang ada. Ketiga hal tersebut juga menentukan grafik dari getaran yang ada. Dengan melakukan analisa grafik getaran, karakteristik dari getaran akan diketahui dan dengan diketahuinya karakteristik getaran

maka sifat getaran yang ada pada sebuah mesin dapat ditentukan. Sifat getaran pada suatu mesin inilah yang nantinya dapat menentukan dari komponen apa getaran tersebut disebabkan.

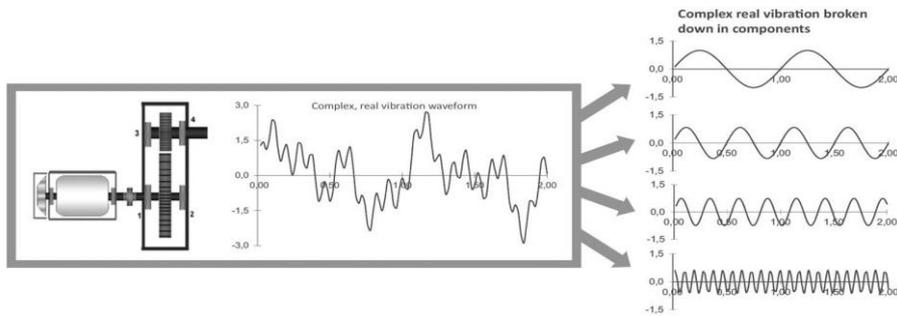
2.3.1 Frekuensi



Gambar 2.3 Gelombang dengan frekuensi tinggi dan rendah.

Sumber: Brainard, J. (2023). *16.7 Wave frequency*. CK-12. <https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-middle-school-physical-science-flexbook-2.0/section/16.7/primary/lesson/wave-frequency-ms-ps/>

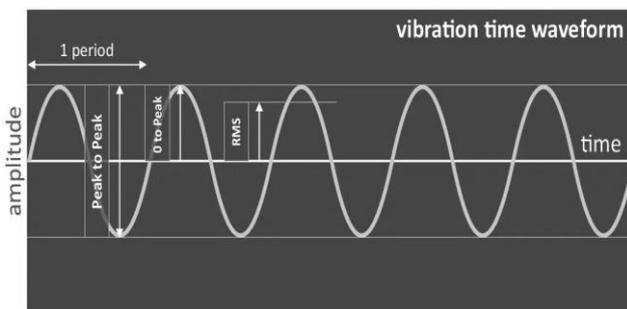
Frekuensi merupakan jumlah gelombang yang dihasilkan oleh getaran dalam satu detik. Semakin tinggi frekuensi dari suatu grafik getaran, maka semakin banyak gelombang yang terbentuk dalam satu detik pada grafik getaran tersebut. Gambar 2.3 menunjukkan perbedaan grafik getaran yang memiliki frekuensi tinggi dan frekuensi rendah. Grafik getaran di dunia nyata memiliki pola grafik gelombang yang kompleks. Pada grafik gelombang kompleks, akan terdapat beberapa frekuensi dalam satu gelombang seperti pada gambar 2.4. Grafik gelombang yang kompleks seperti ini sangat susah untuk dianalisa sehingga membutuhkan pengolahan data untuk mengubah grafik gelombang dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Proses pengubahan data grafik gelombang dari domain waktu ke domain frekuensi dapat dilakukan dengan menggunakan metode FFT (*Fast Fourier Transform*).



Gambar 2.4 Gelombang kompleks yang terdiri dari beberapa frekuensi.

Sumber: Spaseski, P. (2021). *Vibration analysis 101*. Medium. <https://vibcloud.medium.com/vibration-analysis-101-e7d0570e4c60>

2.3.2 Amplitudo



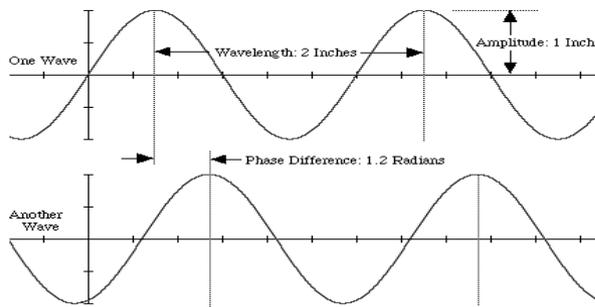
Gambar 2.5 Istilah dalam amplitudo.

Sumber: Spaseski, P. (2021). *Vibration analysis 101*. Medium. <https://vibcloud.medium.com/vibration-analysis-101-e7d0570e4c60>

Amplitudo merupakan simpangan terbesar dari suatu gelombang. Dalam sebuah analisa, amplitudo dapat menentukan kekuatan suatu getaran. Semakin kuat suatu getaran, maka amplitudo dari grafik getaran tersebut akan semakin besar. Sebaliknya getaran yang lemah memiliki amplitudo yang kecil. Dalam hal analisa getaran, amplitudo merupakan salah satu variabel yang cukup penting untuk dipantau karena amplitudo dapat mendeteksi kekuatan getaran yang melebihi batas yang ditentukan. Getaran yang terlalu kuat merupakan salah satu penyebab kerusakan pada komponen mesin. Gambar 2.5 merupakan istilah yang biasa dipakai untuk mengukur nilai amplitudo. *Peak to peak* merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan rentang terjauh sebuah amplitudo. *0 to peak* merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan rentang terjauh sebuah amplitudo dari posisi $Y = 0$. RMS merupakan nilai yang memberikan rata-rata kuadrat akar dari suatu data gelombang dengan

amplitudo tertentu, sehingga RMS dapat diartikan seperti sebuah rata-rata yang digunakan pada data yang berubah-ubah seperti gelombang.

2.3.3 Fase



Gambar 2.6 Fase pada gelombang.

Sumber: *ASF/STEP Interferometry Concept: Phase.* (n.d.).
<https://www.cs.uaf.edu/~olawlor/ref/asf/ifm/concepts/phase.html>

Fase dalam suatu grafik gelombang getaran adalah pergeseran yang terjadi pada suatu gelombang dari titik awal. Gambar 2.6 merupakan contoh pergeseran yang terjadi pada suatu gelombang. Terlihat bahwa kedua gelombang tersebut mempunyai frekuensi dan amplitudo yang sama, tetapi terjadi pergeseran dimana titik puncak gelombang kedua tidak sama dengan titik puncak gelombang pertama, padahal keduanya berada pada titik waktu yang sama (sumbu X menunjukkan amplitudo dan sumbu Y menunjukkan waktu). Fase memiliki satuan radian atau derajat.

2.4 Pengukuran Getaran

Tabel 2.1

Tingkat batasan getaran menurut dokumen ISO-10816.

RMS Vibration Velocity (mm/s)	Class I	Class II	Class III	Class IV
0.28	A	A	A	A
0.45				
0.71				
1.12	B	B	B	B
1.8				
2.8	C	C	C	C
4.5				
7.1	D	D	D	D
11.2				
18				
28				
45				

Sumber: International Organization for Standardization. (1995). *Mechanical vibration – evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – part 1: general guidelines*.

Pengukuran getaran merupakan kegiatan yang paling umum dilakukan dalam perawatan prediktif (Rachman, *et al.*, 2018). Pengukuran dilakukan dengan melihat RMS (*Root Mean Square*) dari sebuah getaran. RMS merupakan total energi efektif yang terdapat pada suatu getaran. International Standards Organization (ISO) menetapkan bahwa unit pengukuran yang diterima secara internasional untuk mengukur getaran mesin adalah kecepatan RMS sebagai satuan pengukuran standar (Girdhar & Sheffer, 2004). RMS sangat berguna dalam melakukan analisa getaran karena RMS memberikan nilai energi efektif yang terdapat pada grafik getaran. Dalam melakukan analisa yang lebih detail, grafik getaran mentah yang kompleks perlu disederhanakan dengan menggunakan metode FFT sehingga analisa dapat dilakukan dengan melihat nilai kekuatan getaran pada setiap frekuensi getaran yang ada. Dengan hal tersebut, analisa yang dilakukan dapat menjadi lebih detail dan dapat mengetahui komponen mesin apa menyebabkan getaran tersebut. Nilai RMS dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.4. Dimana $x(t)$ merupakan persamaan gelombang getaran, T merupakan periode, dan t merupakan waktu.

$$x_{rms} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2.4)$$

Pengukuran getaran diatur dalam dokumen ISO-10816. Tabel 2.1 merupakan batasan-batasan yang ditetapkan dalam dokumen ISO-10816 untuk pengukuran pada komponen yang tidak berputar. Pada bagian kolom tabel tersebut terdapat 4 kelas yaitu kelas 1 hingga kelas 4. Kelas tersebut merupakan klasifikasi daya mesin yang digunakan. Kelas 1 merupakan mesin seperti motor listrik hingga besar daya hingga 15 kW, kelas 2 merupakan mesin yang berukuran sedang seperti motor listrik dengan daya sebesar 15 kW hingga 75 kW tanpa dudukan khusus atau motor listrik dengan daya 300 kW dengan dudukan khusus. Kelas 3 merupakan mesin yang berukuran besar dimana massa yang berputar memiliki dudukan yang kuat dan kaku terhadap sumbu pengukuran getaran. Kelas 4 merupakan mesin yang berukuran besar dimana massa yang berputar memiliki dudukan yang relatif fleksibel terhadap sumbu pengukuran getaran, contohnya adalah turbin gas yang menghasilkan daya lebih dari 10 MW. Baris pada tabel 2.1 merupakan tingkat keparahan getaran yang terdapat pada setiap kelas mesin. Tingkat A merupakan tingkat getaran yang biasanya terdapat pada mesin yang masih dalam keadaan baru dan sehat, tingkat B merupakan tingkat getaran yang baik dimana mesin dapat dioperasikan dengan waktu yang lama tanpa adanya pengawasan terhadap kondisi mesin, tingkat C merupakan tingkat getaran yang kurang baik sehingga mesin hanya dapat dioperasikan dalam waktu yang terbatas (tidak bisa dioperasikan secara terus-menerus dalam waktu yang lama) dan harus diawasi selama pengoperasiannya, tingkat D dikategorikan ke dalam tingkat getaran yang parah dimana efek getaran pada tingkat ini dapat merusak komponen mesin yang lain jika dibiarkan menyala secara terus-menerus tanpa adanya pengawasan. Penyetelan alarm biasanya disetel pada keparahan tingkat C, sedangkan penyetelan peringatan kondisi kritis biasanya ditetapkan pada keparahan tingkat antara C hingga D. Pada kondisi kritis, motor listrik harus dihentikan sesegera mungkin untuk mencegah adanya kerusakan pada komponen lainnya.

2.5 Karakteristik Kerusakan *Bearing*

Karakteristik kerusakan *bearing* dapat dilihat dari grafik getaran yang dihasilkan. Kerusakan pada *bearing* dapat dibedakan berdasarkan frekuensi yang ada sebagai berikut.

$$BPF1 = \frac{Nb}{2} \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \cos\theta\right) \times rpm \quad (2.5)$$

$$BPFO = \frac{Nb}{2} \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cos\theta\right) \times rpm \quad (2.6)$$

$$FTF = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \cos\theta\right) \times rpm \quad (2.7)$$

$$BSF = \frac{Pd}{2Bd} \left[1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right)^2 (\cos\theta)^2\right] \times rpm \quad (2.8)$$

dimana:

Nb = Jumlah bola pada *bearing*

Bd = Diameter bola *bearing* (mm)

Pd = Diameter *pitch bearing* (mm)

θ = Sudut kontak (derajat)

$BPFI$ = *Ball Pass Frequency - Inner*

$BPFO$ = *Ball Pass Frequency - Outer*

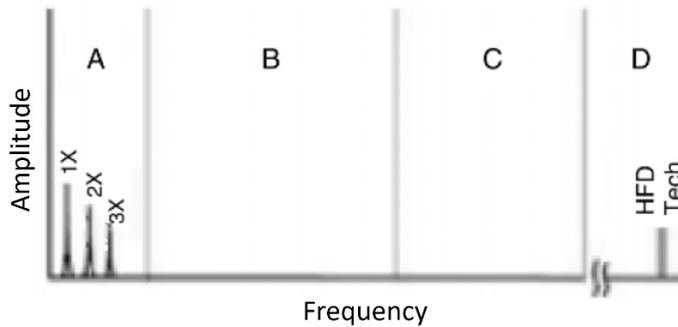
FTF = *Fundamental Train Frequency - Cage*

BSF = *Ball Spin Frequency - Rolling element*

Catatan: RPM merupakan kecepatan putar. Untuk mendapatkan hasil dengan satuan Hz, satuan kecepatan putar RPM perlu dikonversi menjadi Hz.

Dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa *bearing* memiliki frekuensi tersendiri untuk setiap komponen penyusunnya. Terdapat hal menarik dimana dalam grafik FFT dua buah frekuensi dapat dideteksi yaitu BPFI dan BPFO (Girdhar & Sheffer, 2004). Grafik FFT untuk mendeteksi kerusakan *bearing* dapat dibagi kedalam 4 zona yaitu zona A, B, C, dan D. Karakteristik kerusakan pada *bearing* dapat dibagi menjadi 4 kelas sebagai berikut (Girdhar & Sheffer, 2004).

2.5.1. Kerusakan Kelas Pertama

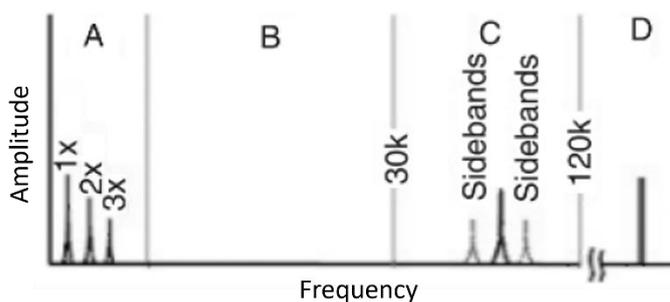


Gambar 2.7 Kerusakan kelas pertama dalam tampilan grafik FFT.

Sumber: Girdhar, P., & Sheffer, C. (2004). *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance* (1st ed.). Elsevier. p. 113.

Kerusakan *bearing* kelas pertama terjadi pada zona D yang memiliki frekuensi sangat tinggi yaitu diatas 120 kCPM. Frekuensi ini tergolong sangat tinggi dan membutuhkan teknik pendeteksi khusus seperti *gSE* (*Spike Energy*), *SEE*, *PeakVue*, *SPM*, dan lain-lain. Gambar 2.7 menunjukkan tampilan grafik FFT untuk kerusakan kelas pertama. Pada kelas pertama, kondisi fisik dari *bearing* masih terlihat cukup baik dan tidak terdapat goresan pada permukaannya. Tetapi permukaan *bearing* tidak akan terlihat mengkilap seperti baru.

2.5.2. Kerusakan Kelas Kedua



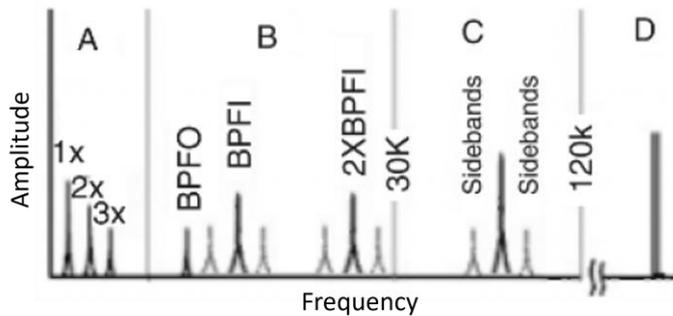
Gambar 2.8 Kerusakan kelas kedua dalam tampilan grafik FFT.

Sumber: Girdhar, P., & Sheffer, C. (2004). *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance* (1st ed.). Elsevier. p. 114.

Kerusakan *bearing* kelas kedua terjadi pada frekuensi 30-120 kCPM. Bola pada *bearing* yang berjalan pada jalurnya akan mulai menyebabkan munculnya natural frekuensi dari komponen *bearing*. Terdapat juga kemungkinan dimana muncul frekuensi *sideband* (frekuensi

kerusakan *bearing* \pm rpm) (Girdhar & Sheffer, 2004). Frekuensi *sideband* tersebut muncul sebelum dan setelah *peak* dari frekuensi natural *bearing*. Gambar 2.8 menunjukkan frekuensi yang muncul di kerusakan kelas kedua pada grafik FFT.

2.5.3. Kerusakan Kelas Ketiga

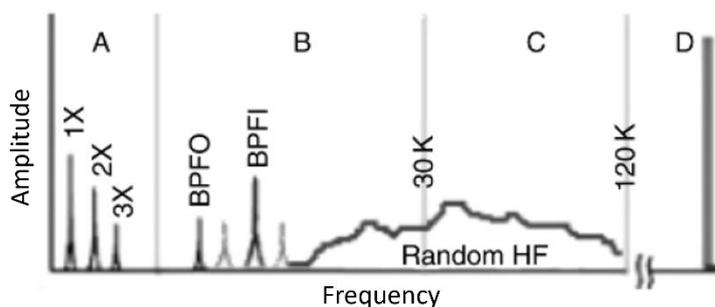


Gambar 2.9 Kerusakan kelas ketiga dalam tampilan grafik FFT.

Sumber: Girdhar, P., & Sheffer, C. (2004). *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance* (1st ed.). Elsevier. p. 114.

Kerusakan kelas ketiga ditandai dengan adanya frekuensi diskrit dan harmonik dari *bearing* pada grafik FFT. Pada kelas ketiga ini kerusakan pada *bearing* akan terlihat jelas secara fisik. Sehingga kerusakan *bearing* kelas ketiga ini sangat tepat untuk melakukan penggantian *bearing*. Gambar 2.9 menunjukkan frekuensi yang mulai muncul pada zona B di grafik FFT. Pada grafik FFT tersebut terdapat juga frekuensi harmonik yang muncul yaitu 2 kali frekuensi dari BRFI.

2.5.4. Kerusakan Kelas Keempat

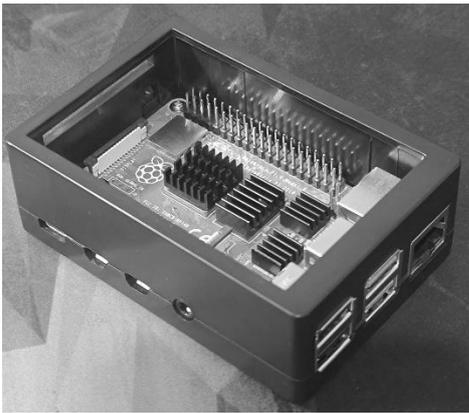


Gambar 2.10 Kerusakan kelas keempat dalam tampilan grafik FFT.

Sumber: Girdhar, P., & Sheffer, C. (2004). *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance* (1st ed.). Elsevier. p. 115.

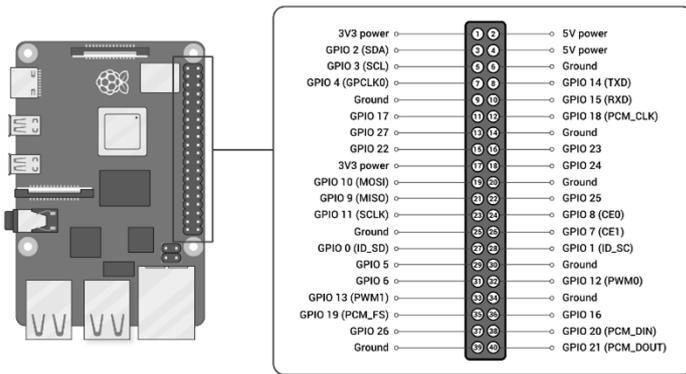
Kerusakan kelas keempat ditandai dengan adanya pola berupa “punuk” antara zona B dan zona C. Pada kelas keempat kondisi *bearing* sudah masuk dalam kondisi rusak parah dan harus segera dilakukan penggantian. Gambar 2.10 menunjukkan pola yang tercipta pada kerusakan kelas keempat. Bahkan amplitudo pada komponen yang memiliki frekuensi 1 x RPM akan naik (Girdhar & Sheffer, 2004).

2.6 Raspberry Pi 4



Gambar 2.11 Raspberry Pi 4.

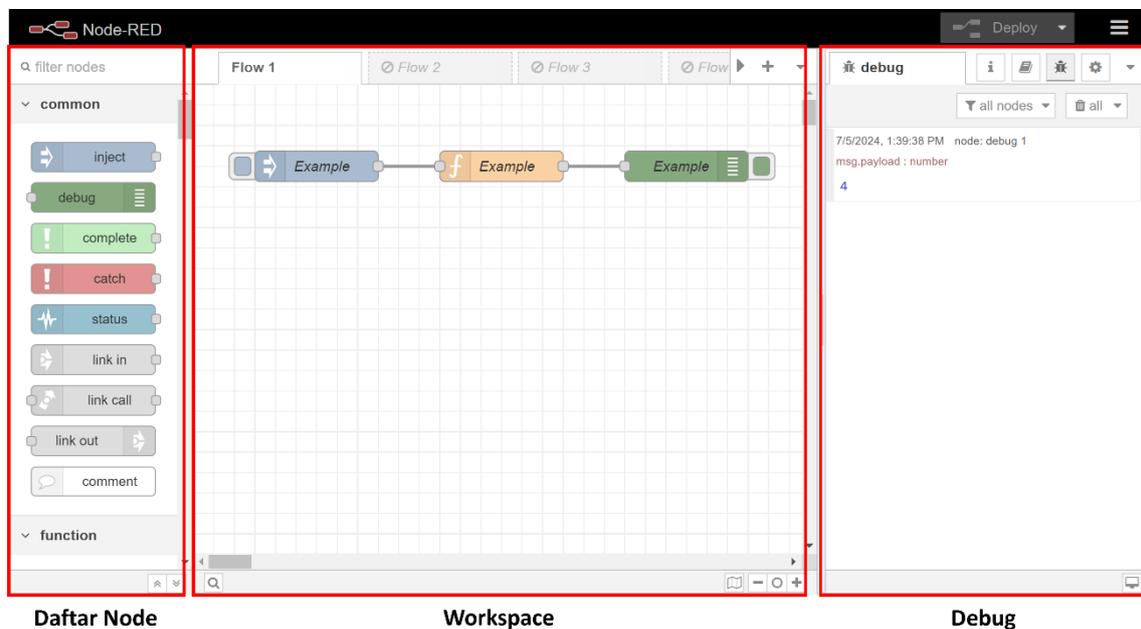
Raspberry Pi 4 merupakan sebuah mini komputer yang dilengkapi dengan *input* dan *output port* seperti USB, *ethernet*, *audiojack*, mini HDMI, dan pin GPIO (*General Purpose Input/Output*). Gambar 2.11 merupakan bentuk Raspberry Pi 4 yang berada dalam *case*. Dari *port* yang dimilikinya, Raspberry Pi sudah sangat mirip dengan sebuah *motherboard* yang ada pada komputer, tetapi pada Raspberry Pi terdapat satu *port* khusus, yaitu GPIO. GPIO merupakan sebuah *port* yang ada pada Raspberry Pi dan memiliki fungsi untuk berkomunikasi dengan sebuah sensor dengan sinyal digital. Raspberry Pi dapat digunakan untuk melakukan pengambilan data dari sebuah sensor dengan berbagai macam *port* yang tersedia. Raspberry Pi menggunakan *operating system* berbasis *linux* sehingga sudah mendukung *web based programming* seperti *Node-Red*. Hal tersebut membuat pemrograman dapat dilakukan melalui sebuah web browser saja seperti Google Chrome ataupun Microsoft Edge. Susunan pin GPIO dari Raspberry Pi dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 GPIO pin pada Raspberry Pi 4.

Sumber: *Raspberry pi documentation - raspberry pi hardware.* (n.d.).
<https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>

2.7 Node-Red

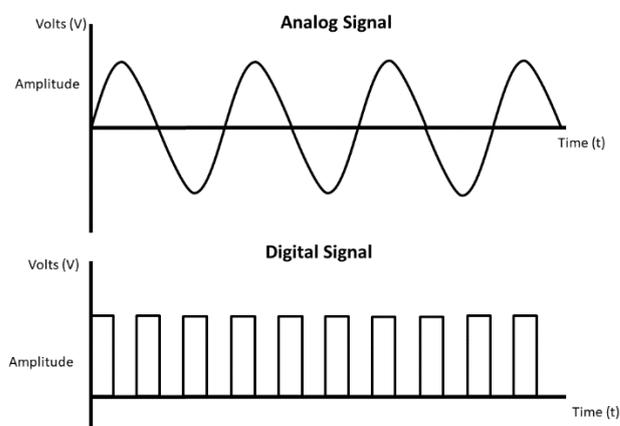


Gambar 2.13 Tampilan *Node-Red*.

Node-Red merupakan *software* pemrograman dengan bentuk *web based programming*. Dengan *web-based programming*, pemrograman dapat dilakukan melalui sebuah *web browser* saja seperti Google Chrome ataupun Microsoft Edge. Hal ini membantu proses pemrograman dimana perangkat keras tidak memerlukan spesifikasi yang tinggi untuk melakukan pemrograman. *Node-Red* menggunakan metode pemrograman *flow based programming*. *Flow based programming* merupakan salah satu metode pemrograman yang dapat divisualisasikan

menggunakan *flowchart* seperti pada gambar 2.13. Dalam *Node-Red*, kotak-kotak yang menyusun *flowchart* tersebut disebut dengan *node*. *Node* dapat memiliki berbagai fungsi sesuai dengan program dan setelan yang ada pada *node* tersebut. *Node-Red* juga merupakan pemrograman yang bersifat *open source*, dimana *node* yang dibuat oleh satu orang dapat digunakan oleh orang lain ketika orang yang membuat *node* tersebut bersedia membagikan *node* yang dibuat olehnya. Hal ini tentu sangat mempermudah proses pemrograman pada *Node-Red*. *Node-Red* memiliki beberapa bagian utama. Bagian sebelah kiri merupakan daftar *node* yang telah tersedia dan siap untuk digunakan. Bagian tengah merupakan *workspace* yang nantinya akan menjadi tempat dimana *node* akan disusun dan disambungkan sesuai dengan program yang dibuat. Pada bagian *workspace* ini terdapat juga beberapa tab yang dapat diganti-ganti sesuai dengan kebutuhan pemrograman. Fitur tab ini memungkinkan pengguna untuk membuat dan menjalankan program untuk berbagai macam keperluan yang berbeda. Bagian sebelah kanan merupakan debug dari *Node-Red*. Pada bagian inilah *output* dari pemrograman yang dibuat dapat ditampilkan dengan menambahkan *node* “*Debug*” pada bagian akhir dari alur pemrograman. Debug juga berfungsi untuk menampilkan *error* yang terjadi ketika terdapat kesalahan dalam melakukan pemrograman. *Node* yang dibuat oleh orang lain dan telah diterbitkan dalam *website Node-Red* dapat ditambahkan ke dalam daftar *node* dengan menekan simbol garis tiga pada kanan atas dan memilih opsi “*Manage Palette*”. Dalam menu “*Manage Palette*” tab “*Install*” dipilih untuk mencari nama dari *node* yang ingin dimasukkan ke dalam daftar *node*.

2.8 Sinyal Sensor



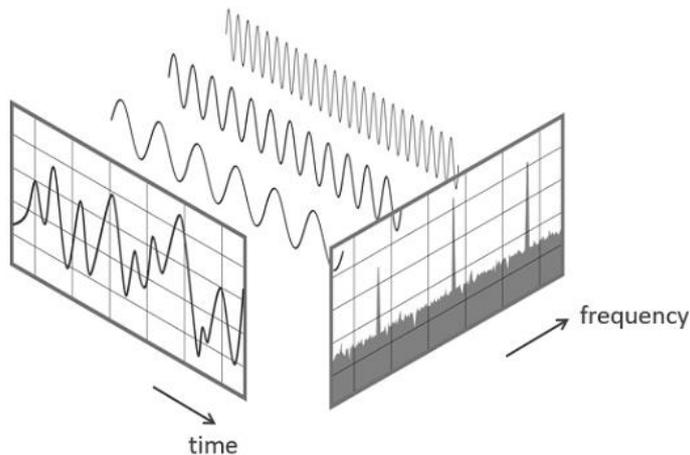
Gambar 2.14 Perbedaan grafik dari sinyal analog dan sinyal digital.

Sumber: Nand Technicals. (2022). *Analog Signal VS Digital Signal*.
<https://www.nandantechnicals.com/2022/10/analog-signal-vs-digital-signal.html>

Sensor adalah peralatan yang digunakan untuk mengubah suatu besaran fisik menjadi besaran listrik sehingga dapat dianalisa dengan rangkaian listrik tertentu (Rahmadhani & Arum, 2022). Arus listrik dari sensor kemudian akan dikirimkan ke sebuah *controller*. Dalam *controller* arus listrik tersebut akan diterjemahkan kedalam satuan pengukuran sesuai dengan kegunaan dari sensor tersebut. Sensor sangat berguna untuk pengukuran karena sensor dapat memberikan data dari sebuah pengukuran melalui sinyal tersebut. Arus listrik yang dikirimkan oleh sensor biasanya disebut sebagai sinyal.

Sinyal pada sensor terbagi menjadi dua jenis yaitu sinyal digital dan sinyal analog. Sinyal digital merupakan sinyal yang dikirimkan oleh sensor tetapi hanya memiliki dua nilai saja saat diterjemahkan. Sedangkan sinyal analog merupakan sinyal yang dikirimkan oleh sensor dan memiliki rentang nilai saat diterjemahkan. Contoh dari sinyal digital adalah sensor yang dapat mendeteksi keadaan suatu benda. Sensor jenis ini biasa digunakan dalam otomasi konveyor untuk mendeteksi keberadaan suatu benda. Sensor jenis ini hanya bisa mendeteksi ada atau tidaknya suatu benda (2 nilai *output*). Sedangkan contoh dari sinyal analog adalah sensor getaran seperti akselerometer. Akselerometer dapat memberikan rentang nilai sesuai dengan spesifikasi pada akselerometer yang digunakan. Dengan adanya rentang nilai tersebut akselerometer dapat memberikan nilai yang berbeda-beda setiap saat sesuai dengan situasi pengukuran. Sensor ini memiliki jenis pemasangan kontak (kontak langsung dengan permukaan benda). Kontak sensor tersebut dipasang pada objek yang bergetar untuk mengukur getaran pada objek tersebut (Venkata Rao & Murthy, 2016). Secara umum sensor analog dapat memberikan informasi lebih banyak karena memiliki rentang nilai, tidak seperti sensor digital yang hanya dapat memberikan dua nilai saja. Perbedaan dari grafik sinyal digital dan analog dapat dilihat pada gambar 2.14.

2.9 FFT (*Fast Fourier Transform*)



Gambar 2.15 Pengubahan grafik dalam domain waktu menjadi domain frekuensi pada FFT.

Sumber: *Fast Fourier Transform FFT – Basics*. (n.d.). <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft>

FFT (*Fast Fourier Transform*) Merupakan metode untuk mengolah data suatu gelombang yang kompleks menjadi lebih sederhana dan mudah untuk dianalisa dalam bentuk spektrum. Dalam analisa gelombang metode FFT digunakan untuk mengubah data gelombang yang sebelumnya dalam domain waktu menjadi domain frekuensi seperti pada gambar 2.15. Pada gambar 2.15 dapat dilihat bahwa FFT dapat memecah gelombang kompleks yang terdiri dari gabungan berbagai macam frekuensi menjadi sebuah spektrum frekuensi. Dengan spektrum tersebut frekuensi-frekuensi yang tergabung dalam gelombang kompleks dapat diketahui. Hal ini tentunya sangat berguna dalam analisa getaran mengingat setiap komponen mesin memiliki karakteristik frekuensinya tersendiri. Pada dasarnya FFT merupakan algoritma yang membantu proses perhitungan dari DFT (*Discrete Fourier Transform*). DFT merupakan salah satu bentuk dari *Fourier Transform* (FT). FT berfungsi untuk mengubah sinyal dari domain waktu menjadi domain frekuensi dalam sinyal kontinu. Sedangkan DFT berfungsi untuk mengubah sinyal dari domain waktu menjadi domain frekuensi dalam sinyal diskrit (spektrum). FT dapat didefinisikan sebagai persamaan 2.9 (Chapra, 2012).

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.9)$$

dimana:

$F(\omega)$ = Transformasi fourier dari $f(t)$

$f(t)$ = Fungsi dalam domain waktu

t = waktu

ω = Frekuensi sudut = $2\pi f$

i = Bilangan imajiner

Sedangkan transformasi diskrit Fourier dapat didefinisikan sebagai persamaan 2.10 (Chapra, 2012).

$$F_k = \sum_{j=0}^{n-1} f_j e^{-ik\omega_0 j} \quad \text{Untuk } k = 0 \text{ hingga } n - 1 \quad (2.10)$$

dimana:

F_k = Transformasi Fourier diskrit pada titik k

n = Total data pengukuran

j = Titik pengukuran

ω_0 = Faktor skala frekuensi = $\frac{2\pi}{n}$

k = Titik nilai frekuensi pengukuran

Dalam DFT terdapat juga salah satu aspek penting yang harus dipahami yaitu *nyquist frequency*. Frekuensi terbesar yang dapat diukur dalam sebuah sinyal adalah *nyquist frequency*, yaitu setengah dari *sampling frequency* (Chapra, 2012). *Sampling frequency* adalah kecepatan pengambilan sampel yang memiliki satuan sampel/detik. *Nyquist frequency* dapat didefinisikan melalui persamaan 2.11 (Chapra, 2012).

$$f_{max} = 0.5f_s \quad (2.11)$$

dimana:

f_{max} = Frekuensi maksimal yang dapat dideteksi

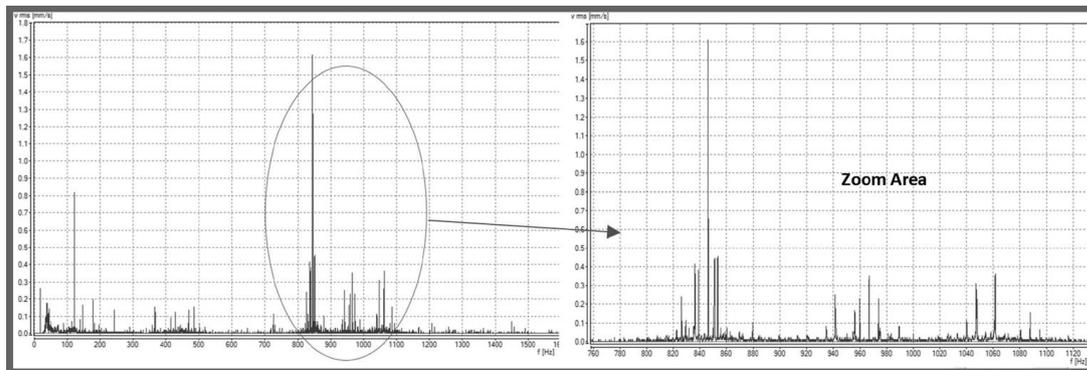
f_s = *Sampling frequency*

Frekuensi terendah yang dapat dideteksi adalah *inverse* dari *sample length* (t_n) (Chapra, 2012). Frekuensi terendah yang bisa dideteksi dapat didefinisikan melalui persamaan 2.12.

$$f_{min} = \frac{n}{f_s} \quad (2.12)$$

Proses DFT seperti ini akan memakan waktu yang lama jika jumlah sampel atau data yang akan diolah sangat banyak. Oleh sebab itu, algoritma FFT digunakan untuk menghitung DFT secara lebih efisien. Penghitungan dengan menggunakan algoritma FFT dapat dilakukan pada *software* pemrograman seperti Matlab ataupun Mathcad. Terdapat juga beberapa penelitian yang menerapkan algoritma FFT untuk mengolah dan analisa data sebagai berikut.

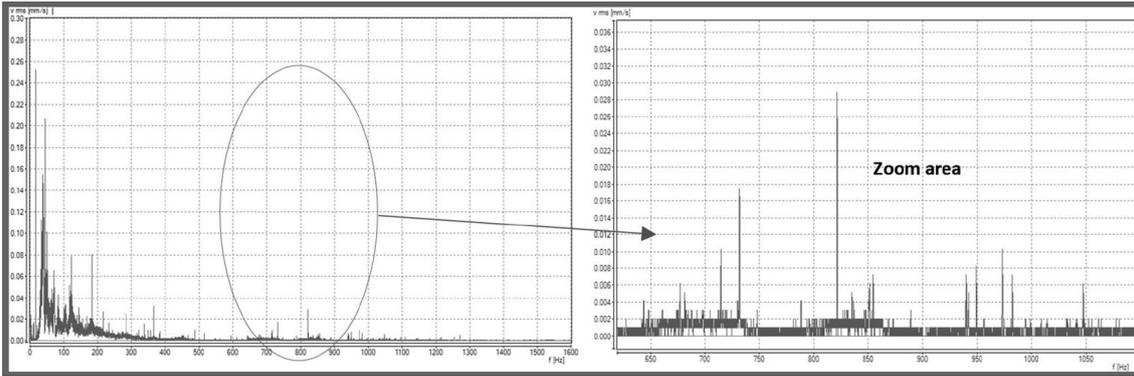
2.9.1. Bearing Failure Analysis Using Vibration Analysis and Natural Frequency Excitation



Gambar 2.16 Grafik FFT dari *bearing* yang mengalami kerusakan.

Sumber: Hemati, A., & Shooshtari, A. (2023). Bearing failure analysis using vibration analysis and natural frequency excitation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 23(4), 1431–1437. <https://doi.org/10.1007/s11668-023-01700-0>

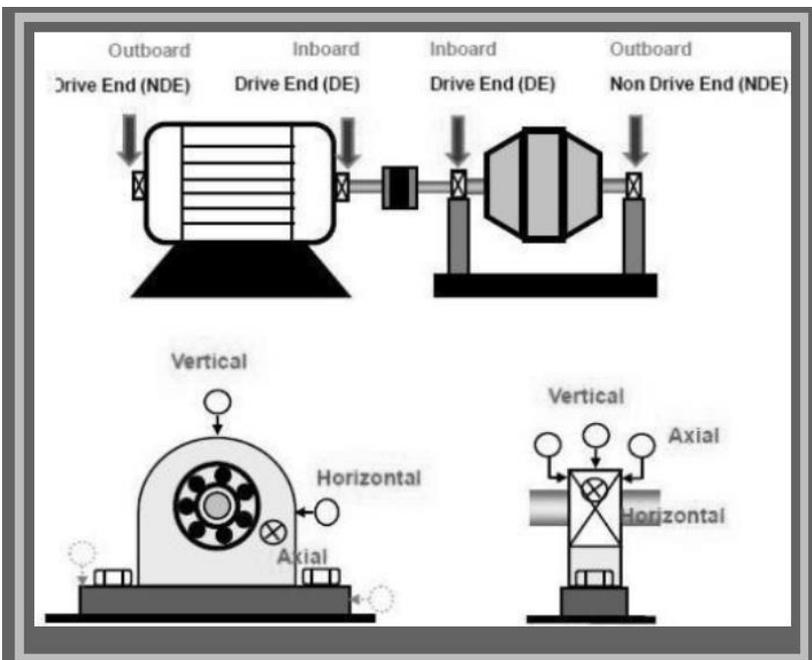
Penelitian ini dilakukan oleh Ali Hemati & Alireza Shooshtari. Penelitian ini dilakukan untuk membuktikan perhitungan frekuensi natural *bearing* yang diberikan oleh manufaktur *bearing* dapat mendeteksi kerusakan pada *bearing*. Penelitian ini menggunakan FFT sebagai algoritma pengolahan dan analisa data. *Fast fourier transform* (FFT) adalah salah satu metode standar dalam mendeteksi kerusakan *bearing* (Hemati & Shooshtari, 2023). Gambar 2.16 menunjukkan bahwa terdapat lonjakan amplitudo pada frekuensi 845.72 Hz. Nilai tersebut tidak berbeda jauh dengan hasil perhitungan melalui persamaan yang diberikan oleh manufaktur *bearing* yaitu 868 Hz. Natural frekuensi yang memiliki amplitudo lebih besar dari frekuensi kecepatan dari mesin akan berdampak buruk terhadap kondisi *bearing* (Hemati & Shooshtari, 2023). Sebagai perbandingan Gambar 2.17 menunjukkan grafik FFT pada kondisi *bearing* yang baik. Hal ini dapat terlihat bahwa frekuensi pada 845.72 Hz memiliki amplitudo paling tinggi. Dengan begitu penelitian ini berhasil membuktikan informasi yang diklaim oleh manufaktur *bearing*.



Gambar 2.17 Grafik FFT dari *bearing* yang memiliki kondisi baik.

Sumber: Sumber: Hemati, A., & Shoostari, A. (2023). Bearing failure analysis using vibration analysis and natural frequency excitation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 23(4), 1431–1437. <https://doi.org/10.1007/s11668-023-01700-0>

2.9.2. Analisa Level Getaran *Cooling Water Pump 1* Jenis Sentrifugal

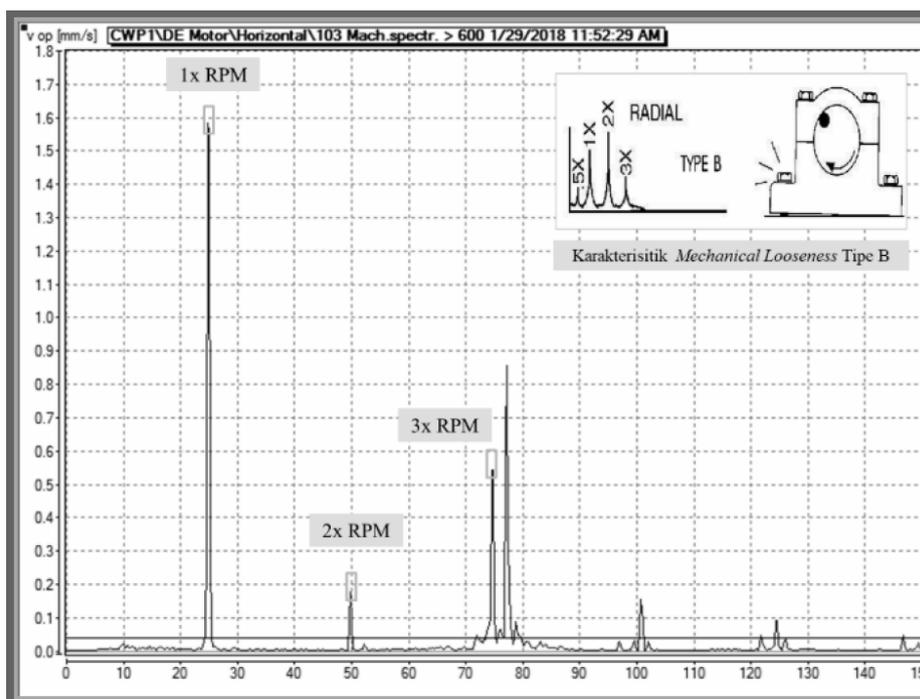


Gambar 2.18 Posisi penempatan sensor saat pengambilan data.

Sumber: Carnegie, N., Suryadi, D., & Fitrilina. (2020). Analisa getaran cooling water pump 1 jenis sentrifugal. *Jurnal Rekayasa Mekanik*, 4(1), 25-32. <https://doi.org/10.33369/rekayasamekanika.v4i1.13275>

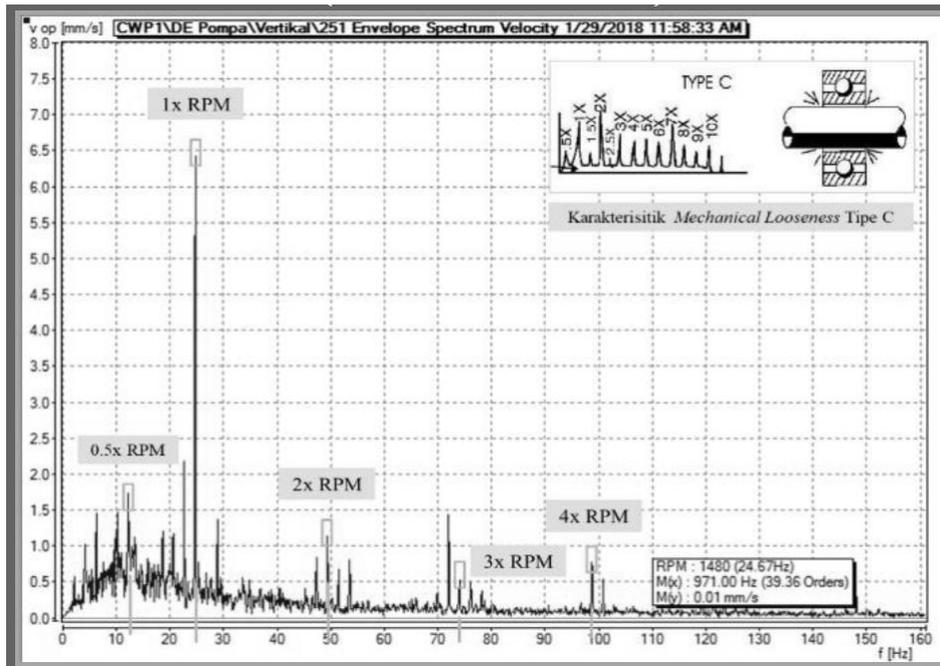
Penelitian ini dilakukan oleh Carnegie et al yang bertujuan untuk menganalisa getaran pompa sentrifugal yang digunakan untuk sistem pendingin di PLTA Musi. Penelitian ini

menggunakan algoritma FFT untuk melakukan pengolahan dan analisa dari data yang didapatkan. Sinyal getaran dapat diuraikan atas komponen-komponennya dalam domain frekuensi (Carnegie, *et al.*, 2020). Dengan begitu analisa akan semakin mudah untuk dilakukan. Gambar 2.18 merupakan skema penempatan sensor getaran pada alat yang dianalisa. Dalam penelitian ini amplitudo yang melewati batas aman terdapat pada posisi DE motor dan DE pompa. Gambar 2.19 dan 2.20 merupakan tampilan grafik FFT dari DE motor dan DE pompa. Motor listrik yang digunakan berputar dengan kecepatan 1486 rpm. Sehingga untuk nilai 1 x rpm adalah 24.67 Hz (1 Hz = 60 Rpm).



Gambar 2.19 Grafik FFT pada DE motor.

Sumber: Carnegie, N., Suryadi, D., & Fitrilina. (2020). Analisa getaran cooling water pump 1 jenis sentrifugal. *Jurnal Rekayasa Mekanik*, 4(1), 25-32. <https://doi.org/10.33369/rekayasamekanika.v4i1.13275>



Gambar 2.20 Grafik FFT pada DE pompa.

Sumber: Carnegie, N., Suryadi, D., & Fitrilina. (2020). Analisa getaran cooling water pump 1 jenis sentrifugal. *Jurnal Rekayasa Mekanik*, 4(1), 25-32. <https://doi.org/10.33369/rekayasamekanika.v4i1.13275>

Pada gambar 2.19 terlihat adanya pola yang mengindikasikan *mechanical looseness* tipe B yang terjadi pada frekuensi 1 x rpm, 2 x rpm, dan 3 x rpm. *Mechanical looseness* tipe B disebabkan oleh longgarnya *pillow block/ring/cincin* baut, struktur rangka atau bantalan *bearing* yang retak (Carnegie, *et al.*, 2020). Sedangkan *mechanical looseness* tipe C biasanya dihasilkan oleh ketidaktepatan kesesuaian antar komponen yang menyebabkan banyak harmonik akibat dari respon nonlinier bagian yang longgar terhadap gaya dinamis dari rotor (Carnegie, *et al.*, 2020). *Mechanical looseness* tipe C dapat dilihat pada gambar 2.20 yaitu pada posisi DE pompa. Perlu diperhatikan bahwa *looseness* sering muncul sub-harmonik tepat pada 1/2 atau 1/3 rpm (0.5x, 1.5x, 2.5x, dll) (Carnegie, *et al.*, 2020). Dari penelitian tersebut terdapat beberapa saran dan tindakan yang perlu dilakukan seperti meningkatkan frekuensi *monitoring* pada mesin yang memiliki amplitudo diatas batas aman, memantau histori perbaikan, dan melakukan pemeriksaan terhadap komponen yang menyebabkan getaran.