

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 1.1. Tinjauan Pustaka

Pada bagian ini peneliti mendeskripsikan beberapa hasil penelitian yang sebelumnya telah dilakukan oleh peneliti lain dan diambil hal yang berkorelasi dengan pembahasan identifikasi cacat roda gigi menggunakan analisis spektrum dan *Continuous Wavelet Transform (CWT)*.

Pribadi dkk (2014) melakukan penelitian terhadap deteksi kerusakan roda gigi menggunakan analisis sinyal getaran yang berbasis pada domain frekuensi. Salah satu metode analisis yang digunakan adalah analisis spektrum. Benda uji yang diteliti berupa roda gigi *pinion* dengan empat kondisi yaitu normal, cacat patah setengah gigi, cacat patah satu gigi, dan cacat berupa keausan. Rasio kecepatan putar antara roda gigi *gear* dan *pinion* adalah 1:2 dengan jumlah gigi *gear* sebanyak 30 *teeth* dan *pinion* 15 *teeth*. Data sinyal getaran diambil pada kecepatan poros 1000 rpm. Analisis hasil spektrum menunjukkan pada kondisi normal *Gear Mesh Frequency (GMF)* terjadi pada frekuensi 253,5 Hz dengan nilai amplitudo sebesar 0,003542 Volt. Pada kondisi roda gigi mengalami patah setengah gigi nilai *GMF* adalah 252,5 Hz dengan besar amplitudo 0,004867 Volt. Roda gigi kondisi patah satu gigi menunjukkan nilai *GMF* sebesar 235 Hz dengan amplitudo sebesar 0,0056 Volt. Sedangkan pada roda gigi aus nilai *GMF* sebesar 251 Hz dengan amplitudo 0,0036 Volt. Dalam hal ini disimpulkan bahwa semakin parahnya kerusakan yang terjadi pada roda gigi menyebabkan meningkatnya nilai amplitudo yang terjadi pada *GMF*. Sedangkan untuk kondisi aus, kenaikan nilai amplitudo terhadap roda gigi kondisi normal tidak terlihat signifikan.

Vernekar *et al.* (2014) dalam penelitiannya yang melibatkan komponen *gearbox* Bajaj KB-100 mengamati tingkat kerusakan roda gigi menggunakan analisis sinyal getaran dengan metode spektrum dan *Continuous Wavelet Transform (CWT)*. Variasi roda gigi yang digunakan adalah roda gigi kondisi normal dan roda gigi kondisi cacat dengan patah satu mata gigi. Perbandingan

analisis spektrum roda gigi cacat terhadap roda gigi normal didapatkan adanya kenaikan *magnitude GMF* dari 0,02 menjadi 0,08. Plot *spectrogram CWT* kondisi roda gigi normal menunjukkan adanya amplitudo yang tinggi pada frekuensi 34 Hz yang terjadi pada waktu 0,7 seconds. Besar nilai frekuensi ini merupakan frekuensi modulasi (2x) dari frekuensi *crank shaft*. Pada plot grafik *CWT* dengan kondisi cacat menunjukkan eksistensi dari frekuensi *crank shaft* yang lebih dominan dibanding dengan kondisi normal. Selain itu, pada plot tersebut juga diiringi munculnya *GMF* yang terlihat lebih jelas. Naiknya tingkat gradasi warna pada plot *spectrogram CWT* mengidentifikasi semakin meningkatnya kerusakan pada komponen tersebut.

Widodo dkk. (2015) melakukan penelitian getaran terhadap empat jenis roda gigi dengan metode *Continuous Wavelet Transform (CWT)*. Keempat kondisi roda gigi tersebut meliputi roda gigi dengan kondisi normal, roda gigi dengan patah setengah gigi, roda gigi dengan patah satu gigi, dan roda gigi dalam kondisi aus. Plot yang ditampilkan pada analisis *CWT* berbentuk *scalogram* dengan perbandingan waktu dan skala. Sebelum dilakukannya analisis *CWT*, dilakukan proses *denoising signal* menggunakan *Time Synchronous Averaging (TSA)* untuk mereduksi *noise*. Pada plot *CWT* kondisi normal dengan menggunakan skala warna, nilai gradasi warna yang menunjukkan amplitudo tinggi sebesar 0,118. Pada kondisi patah setengah gigi, nilai gradasi warna menunjukkan angka 0,401. Pada kondisi patah satu gigi, nilai gradasi warna menunjukkan angka 0,773. Sedangkan pada kondisi aus, nilai gradasi warna menunjukkan angka 0,656. Kesimpulannya, semakin parahnya cacat pada roda gigi ditunjukkan dengan nilai gradasi warna yang meningkat. Pada kondisi aus tingkat kerusakan berdasarkan nilai gradasi berada diantara patah setengah gigi dengan patah satu gigi.

Hidayat & Santoso (2017) melakukan penelitian deteksi cacat roda gigi menggunakan analisis sinyal emisi akustik. Tingkat kerusakan roda gigi yang diteliti adalah patah 25%, 50%, 75%, dan 100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kerusakan yang semakin besar dapat terdeteksi menggunakan *scalogram CWT*. Indikator emisi akustik RMS, P2P, dan kurtosis belum dapat

menentukan tingkat kerusakan roda gigi secara kuantitatif dan kualitatif. Transformasi wavelet dengan morlet wavelet pada sinyal emisi akustik menghasilkan *scalogram* yang dapat digunakan untuk mengamati tingkat pada kerusakan roda gigi.

Berdasarkan beberapa hasil penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa sinyal getaran dan sinyal emisi akustik menggunakan metode spektrum dan *Continuous Wavelet Transform (CWT)* dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan pada roda gigi. Analisis berbasis sinyal getaran merupakan metode yang lebih efektif dibanding sinyal emisi akustik. Hal ini dikarenakan sinyal emisi akustik rentan terhadap gangguan dari suara luar.

## **1.2. Landasan Teori**

### **2.2.1. *Fan* atau Kipas**

*Fan* merupakan salah satu mesin fluida yang didesain untuk mengalirkan fluida dari satu tempat ke tempat lain dalam fase gas seperti udara. Prinsip dasar dari cara kerja *fan* adalah dengan memanfaatkan gaya *lift* pada sudu sehingga menghasilkan perbedaan tekanan pada pipa hisap dan pipa tekan. Penggunaan *fan* hampir selalu digunakan pada setiap aspek kehidupan baik pada perkantoran, perumahan, maupun perindustrian. Penggunaan dari *fan* sangat beragam tergantung dari kebutuhan dan penggunaannya. Beberapa contoh dari penggunaan *fan* adalah menjaga suhu kerja peralatan, pemasok udara bakar dan ventilasi. Banyak modifikasi yang dilakukan pada *fan* untuk mendapatkan debit dan tekanan yang diinginkan (Tanjung, 2015).

#### **1. *Fan* Aksial**

*Fan* aksial (Gambar 2.1) meggerakan aliran udara sepanjang sumbu *fan*. Cara kerja *fan* seperti *impeller* pesawat terbang: *blades* pada *fan* menghasilkan pengangkatan aerodinamis yang menekan udara. *Fan* ini terkenal di industri karena murah, bentuknya yang kompak dan ringan (Ardianto, 2019).



**Gambar 2. 1** *Fan Aksial*  
(Sumber: US DOE, 1989)

## 2. *Fan* Sentrifugal

*Fan* sentrifugal (Gambar 2.2) meningkatkan kecepatan aliran udara dengan *impeller* berputar. Kecepatan meningkat sampai mencapai ujung *blades* dan kemudian diubah ke tekanan. *Fan* ini mampu menghasilkan tekanan tinggi yang cocok untuk kondisi operasi yang kasar, seperti sistem dengan suhu tinggi, aliran udara kotor atau lembab, dan *handling* bahan (Ardianto, 2019).



**Gambar 2. 2** *Fan* Sentrifugal  
(Church. 1993)

### 2.2.2. Roda Gigi

Roda gigi merupakan salah satu instrumen dalam proses transmisi daya dan putaran. Penerusan daya pada roda gigi dilakukan oleh mata gigi dari kedua roda gigi yang saling berkaitan. Roda gigi sering digunakan karena dapat

meneruskan daya dan putaran yang bervariasi. Berdasarkan jenisnya, roda gigi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

### 1. *Spur Gear*

*Spur gear* merupakan jenis roda gigi yang paling umum digunakan dalam sistem transmisi daya. *Spur gear* terdiri dari silinder dengan bentuk roda gigi radial. *Spur gear* dinilai lebih murah dan lebih mudah dalam proses pembuatannya dibanding dengan jenis roda gigi lainnya. *Spur gear* sering digunakan dalam *gearbox* kendaraan bermotor dan mesin penggerak (Childs, 2014).



**Gambar 2. 3** *Spur Gear*

(Sumber:

[https://khkgears.net/new/gear\\_knowledge/introduction\\_to\\_gears/types\\_of\\_gears.html](https://khkgears.net/new/gear_knowledge/introduction_to_gears/types_of_gears.html))

### 2. *Helical Gear*

*Helical Gear* hampir sama dengan *spur gear*, perbedaannya terletak pada sudut mata gigi. Sudut mata gigi pada *helical gear* terletak antara  $15^{\circ}$ - $30^{\circ}$ . Sudut mata gigi inilah yang menghasilkan pergerakan roda gigi yang lebih halus dan sedikit getaran. Roda gigi *helix* cocok untuk transmisi daya besar dan pada putaran yang tinggi.



**Gambar 2. 4** *Helical Gear*

(Sumber:

[https://khkgears.net/new/gear\\_knowledge/introduction\\_to\\_gears/types\\_of\\_gears.html](https://khkgears.net/new/gear_knowledge/introduction_to_gears/types_of_gears.html))

### 3. *Bevel Gear*

Roda gigi dengan ujung giginya berbentuk seperti kerucut terpancung. *Bevel gear* dapat berbentuk lurus seperti *spur gear* atau spiral seperti *helical gear*. *Bevel gear* dapat diaplikasikan pada transmisi motor differensial dan sistem kontrol katup (Childs, 2014).



**Gambar 2. 5** *Bevel Gear*

(Sumber: [https://khkgears.net/new/gear\\_knowledge/introduction\\_to\\_gears/types\\_of\\_gears.html](https://khkgears.net/new/gear_knowledge/introduction_to_gears/types_of_gears.html))

### 4. *Worm Gear*

Roda gigi dengan bentuk menyerupai *screw* berbatang yang dipasangkan pada *spur gear*. *Worm Gear* digunakan untuk mereduksi putaran tinggi. Pengurangan kecepatan tinggi menyebabkan gesekan yang besar sehingga diperlukan sistem pelumasan yang baik.

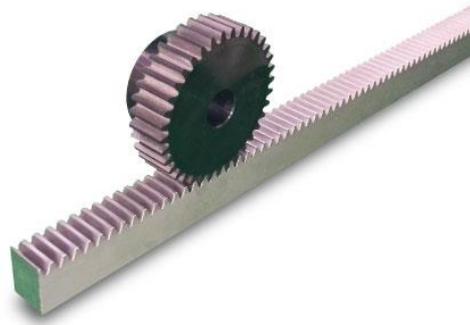


**Gambar 2. 6** *Worm Gear*

(Sumber: [https://khkgears.net/new/gear\\_knowledge/introduction\\_to\\_gears/types\\_of\\_gears.html](https://khkgears.net/new/gear_knowledge/introduction_to_gears/types_of_gears.html))

### 5. Rack Gear

*Rack Gear* dengan bentuk seperti batang yang bergerigi. *Rack Gear* sering dipasangkan pada *spur gear*. Mekanisme ini digunakan untuk mengubah gerakan rotasi ke gerakan linear.



**Gambar 2. 7** Rack Gear

(Sumber: [https://khkgears.net/new/gear\\_knowledge/introduction\\_to\\_gears/types\\_of\\_gears.html](https://khkgears.net/new/gear_knowledge/introduction_to_gears/types_of_gears.html))

#### 2.2.3. Frekuensi Pada Pasangan Roda Gigi

Frekuensi yang terjadi pada pasangan roda gigi seperti yang dijelaskan oleh Fernandez (2014) dan Winterton (1991) diantaranya:

##### 1. Gear Rotational Frequency ( $f_g$ )

Frekuensi kecepatan putar *gear* yang dinyatakan dalam putaran per detik atau hertz (Hz). *Gear Rotational Frequency* dinyatakan dalam Persamaan

2. 1:

$$f_g = \frac{R_g}{60} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dengan :  $f_g$  = frekuensi kecepatan putar *gear* (Hz)

$R_g$  = *gear speed* (rpm)

##### 2. Pinion Rotational Frequency ( $f_p$ )

Frekuensi kecepatan putar *pinion* yang dinyatakan dalam putaran per detik atau hertz (Hz). *Pinion Rotational Frequency* dinyatakan dalam Persamaan

2.2:

$$fp = \frac{Rp}{60} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dengan :     fg     = frekuensi kecepatan putar *pinion* (Hz)  
               Rp     = *pinion speed* (rpm)

### 3. Gear Mesh Frequency (GMF)

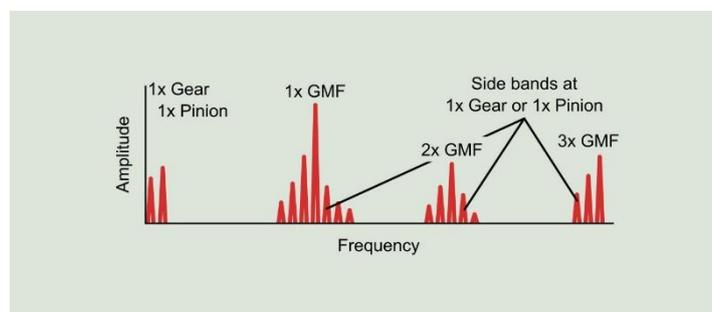
Frekuensi ini merupakan frekuensi pokok yang terjadi ketika roda gigi saling dikaitkan. Nilai frekuensi ini didapat dengan mengalikan jumlah gigi dengan kecepatan putar. Frekuensi dari kedua roda gigi yang berkaitan memiliki besar yang sama. *Gear Mesh Frequency* dinyatakan dalam Persamaan 2.3:

$$GMF = fp \times Np = fg \times Ng \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan :     GMF   = *Gear Mesh Frequency* (Hz)  
               fp     = Frekuensi kecepatan Putar *Pinion* (Hz)  
               Np     = Jumlah Gigi *Pinion*  
               fg     = Frekuensi kecepatan Putar *Gear* (Hz)  
               Ng     = Jumlah Gigi *Gear*

### 4. Gear mesh frequency sidebands

Frekuensi yang ada disekitar *GMF*. Jarak frekuensi *sidebands* terhadap *GMF* sama dengan frekuensi putar *pinion* atau *gear*. *Sidebands* sangat penting dalam diagnosis kerusakan yang ada pada pasangan roda gigi. *GMF Sidebands* ditampilkan pada Gambar 2.8.



**Gambar 2. 8 GMF Sidebands**

(Sumber: <https://power-mi.com/content/troubleshooting-gears>)

### 5. *Hunting Tooth Frequency (HTF)*

Frekuensi yang terjadi ketika titik cacat pada *gear* bertemu dengan titik cacat pada roda gigi *pinion*. Frekuensi ini sangat rendah sehingga sulit ditemukan dalam spektrum, akan tetapi lebih mudah dideteksi dalam bentuk gelombang waktu. *Hunting Tooth Frequency* dinyatakan dalam Persamaan 2.4:

$$HTF = \frac{GMF \times Na}{Np \times Ng} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan :

- $HTF$  = *Hunting Tooth Frequency* (Hz)
- $GMF$  = *Gear Mesh Frequency* (Hz)
- $Na$  = *Number of Phases assembly*
- $Np$  = Jumlah Gigi *Pinion*
- $Ng$  = Jumlah Gigi *Gear*

### 6. *Gear Assembly Phase Frequency (GAPF)*

Frekuensi yang terjadi pada pasangan roda gigi dengan jumlah kedua gigi tidak prima. *GAPF* dihasilkan dengan membagi nilai *GMF* terhadap nilai *phases assembly* ( $Na$ ). *Phases assembly* merupakan nilai kombinasi bilangan prima dari jumlah gigi gear dan pinion. *Gear Assembly Phase Frequency* dinyatakan dalam Persamaan 2.5:

$$GAPF = \frac{GMF}{Na} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan :

- $GAPF$  = *Gear Assembly Phase Frequency* (Hz)
- $GMF$  = *Gear Mesh Frequency* (Hz)
- $Na$  = *Number of Phases assembly*

### 7. *Gear Natural Frequency (GNF)*

*GNF* merupakan frekuensi pribadi yang dimiliki roda gigi. Frekuensi ini dapat diketahui dengan cara memukul roda gigi dalam kondisi diam dan diidentifikasi frekuensi yang dihasilkan.

#### 2.2.4. *Maintenance*

Pengertian *maintenance*/perawatan sebagai konsepsi dari semua aktivitas yang diperlukan untuk menjaga atau mempertahankan kualitas fasilitas/mesin agar dapat berfungsi dengan baik seperti kondisi awalnya (Ansori dan Mustajib, 2013). Tujuan dilakukannya kegiatan perawatan (*maintenance*) adalah sebagai berikut (Kurniawan, 2013):

1. Memperpanjang umur pengoprasian peralatan dan fasilitas industri.
2. Meminimalisasi *Downtime*, yaitu waktu selama proses produksi terhenti (waktu menunggu) yang dapat mengganggu kontinuitas proses.
3. Meningkatkan efisiensi sumber daya produksi.
4. Peningkatan profesionalisme personil departemen perawatan industri.
5. Meningkatkan nilai tambah produk, sehingga perusahaan dapat bersaing di pasar global.
6. Membantu proses pengambilan keputusan, sehingga dapat memilih solusi optimal terhadap kebijakan perawatan fasilitas industri.
7. Melakukan perencanaan terhadap perawatan *preventif*, sehingga memudahkan dalam proses pengontrolan aktivitas perawatan.
8. Mereduksi biaya perbaikan dan biaya yang timbul dari terhentinya proses karena permasalahan keandalan mesin.
9. Mengatasi segala permasalahan, yang berkenaan dengan kontinuitas aktivitas kerja.

Berdasarkan jenisnya, Scheffer & Girdhar (2004) membaginya menjadi empat kategori teknik perawatan yaitu:

1. *Breakdown Maintenance*

Perawatan yang dilakukan tanpa rencana atau secara mendadak. Perawatan ini mengizinkan komponen mesin digunakan sampai terjadi kegagalan, kemudian dilakukan penggantian terhadap komponen tersebut.

2. *Preventive maintenance*

Perawatan atau pemeliharaan yang dilakukan secara rutin dan terencana. Pemeliharaan ini dilakukan dengan interval waktu tertentu atau dengan mengikuti standar manufaktur dari komponen mesin.

### 3. *Predictive Maintenance*

Predictive maintenance atau biasa disebut *condition based maintenance (CBM)* merupakan perawatan yang disesuaikan dengan kondisi. Perawatan ini dilakukan dengan cara memonitoring secara berkala, jika terdapat adanya komponen yang terindikasi rusak akan segera dilakukan *troubleshooting* guna menghindari kegagalan sekunder yang mahal.

#### 2.2.5. *Condition Based Maintenance (CBM)*

*CBM* atau *predictive maintenance* didasarkan pada pengawasan kondisi terhadap gangguan yang dialami oleh suatu mesin ketika beroperasi. Pemantauan kondisi pada pendekatan ini dilakukan secara berkala. Apabila ditemukan indikasi kerusakan, maka bagian-bagian dari mesin tersebut diidentifikasi dan dijadwalkan untuk kegiatan perawatan selanjutnya. Kerusakan pada suatu komponen mesin umumnya dimulai dengan adanya gejala kerusakan ringan, sehingga pendekatan ini merupakan langkah awal dalam proses perawatan untuk menghindari terjadinya tingkat kerusakan yang semakin tinggi. Adapun Teknik pemantauan kondisi yang menerapkan sistem *CBM* berdasarkan Scheffer & Girdhar (2004) diantaranya:

##### 1. *Vibration Monitoring*

Teknik pemantauan kondisi berdasarkan nilai getaran yang dihasilkan. Tinggi atau rendahnya nilai getaran yang dihasilkan oleh suatu mesin akan berpengaruh terhadap kondisi mekanisnya.

##### 2. *Acoustic Emission*

Teknik pemantauan yang didasarkan pada gelombang akustik. *Acoustic Emission* dapat digunakan untuk memonitoring keretakan dalam struktur dan jaringan perpipaan.

##### 3. *Oil Analysis*

Teknik pemantauan kerusakan berdasarkan minyak pelumas yang digunakan. Keberadaan partikel tertentu pada minyak pelumas dapat digunakan untuk analisis kerusakan yang terjadi seperti pada bantalan dan roda gigi.

#### 4. *Particle Analysis*

Komponen mesin yang bergerak dapat menghasilkan serbuk/serpihan. Analisis ini dilakukan dengan mengumpulkan informasi dari serpihan tersebut dan membandingkannya terhadap performa mesin.

#### 5. *Corrosion Monitoring*

Teknik pemantauan dengan memanfaatkan sinyal ultrasonik untuk mengidentifikasi tingkat korosi pada komponen mesin, seperti halnya pada sistem perpipaan.

#### 6. *Thermography*

Teknik pemantauan kondisi yang menggunakan kamera inframerah untuk memeriksa peralatan listrik dan komponen mekanik. Dengan membandingkan suhu peralatan pada saat beroperasi dan suhu operasi normalnya, maka dapat dianalisis ada tidaknya penyimpangan panas (*overheating*) yang merupakan gejala awal kerusakan peralatan.

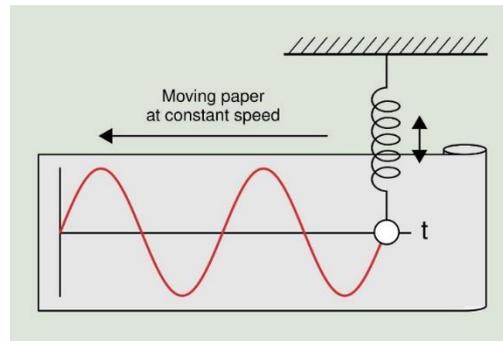
#### 7. *Performance Monitoring*

Salah satu teknik pemantauan yang efektif untuk menentukan masalah operasional pada mesin. Tingkat efisiensi mesin menyediakan wawasan yang baik terhadap kondisi internalnya.

### 2.2.6. Teori Getaran

Getaran merupakan gerakan bolak-balik yang terjadi pada sebuah benda melalui titik kesetimbangan. Getaran dipengaruhi oleh besar energi yang diberikan. Semakin besar energi yang diberikan maka semakin kuat juga getaran yang ditimbulkan. Bentuk dasar dari sinyal getaran dalam domain waktu berupa gelombang sinusoidal. Prinsip terjadinya getaran diilustrasikan pada gambar 2.9.

Sebuah benda dikaitkan pada sebuah pegas. Ketika benda diberikan gaya berupa tarikan dan kemudian dilepaskan, benda akan bergerak naik turun karena sifat kekakuan dari pegas. Proses naik turunnya ini menghasilkan sebuah gelombang sinusoidal.



**Gambar 2. 9** Prinsip Getaran

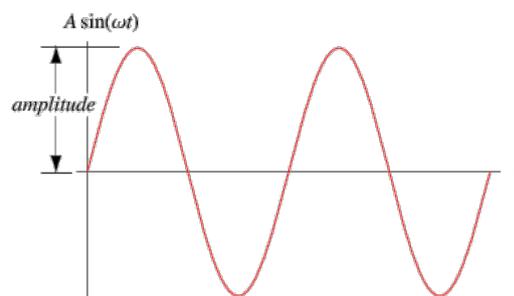
(Sumber: <https://power-mi.com/content/basic-concepts>)

### 2.2.7. Karakteristik Getaran

Getaran memiliki karakteristik yang dapat digunakan untuk membantu proses analisis kerusakan pada sebuah komponen mesin. Karakteristik tersebut antara lain:

#### 1. Amplitudo

Simpangan terjauh dari titik kesetimbangan. Nilai amplitudo pada getaran mengindikasikan jumlah energi relatif yang dipancarkan pada sebuah gelombang. Semakin tinggi nilai amplitudo getaran pada komponen mesin, mengindikasikan semakin besarnya energi yang dipancarkan dan menunjukkan semakin besarnya gangguan yang terjadi pada komponen mesin tersebut. Amplitudo getaran ditampilkan pada Gambar 2.10

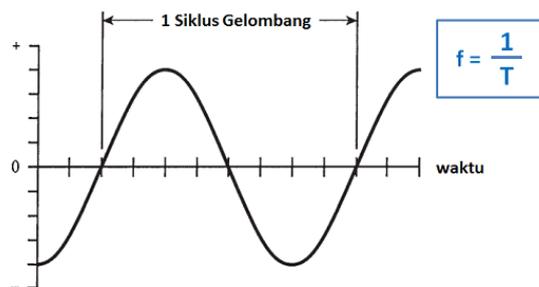


**Gambar 2. 10** Amplitudo Gelombang

(Sumber: <http://mathworld.wolfram.com/Amplitude.html>)

## 2. Frekuensi

Frekuensi merupakan banyaknya periode getaran yang terjadi dalam satu detik. Frekuensi dilambangkan dengan huruf “f” dengan satuan ukuran *Hertz* (Hz). Pada analisis sinyal getaran mesin, frekuensi yang muncul dapat digunakan untuk mengidentifikasi masalah-masalah yang ada pada mesin tersebut. Siklus gelombang frekuensi ditampilkan pada Gambar 2.11.

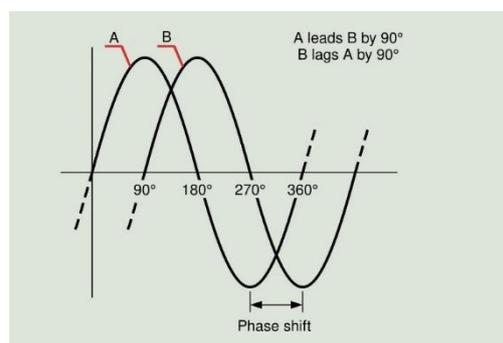


**Gambar 2. 11** Siklus gelombang frekuensi

(Sumber: <https://teknikelektronika.com/pengertian-frekuensi-cara-menghitung-frekuensi/>)

## 3. Phase

*Phase* dapat diartikan posisi awal terjadinya sebuah gelombang. Jarak dari 2 atau lebih gelombang yang berbeda disebut beda fasa (*phase shift*). Beda fasa pada 2 gelombang sinusoidal ditampilkan pada Gambar 2.12.

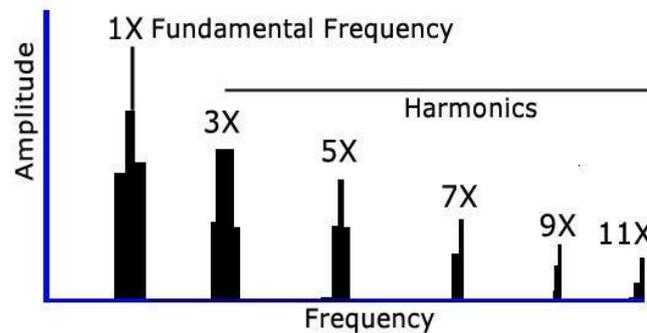


**Gambar 2. 12** Beda fasa pada 2 gelombang sinusoidal

(Sumber: <https://power-mi.com/content/basic-concepts>)

#### 4. Harmonik

Harmonik merupakan gejala pembentukan gelombang dengan frekuensi yang berbeda yang merupakan hasil kali frekuensi utama. Misalnya, suatu gelombang sinyal getaran memiliki frekuensi 20 Hz, maka harmonik kedua pada sinyal tersebut adalah 40 Hz, begitu pula dengan harmonik ketiganya sebesar 60 Hz dan seterusnya. Prinsip harmonik ditampilkan pada gambar 2.13.



**Gambar 2. 13** Harmonik

(Scheffer & Girdhar, 2004)

#### 2.2.8. Metode Analisis Getaran

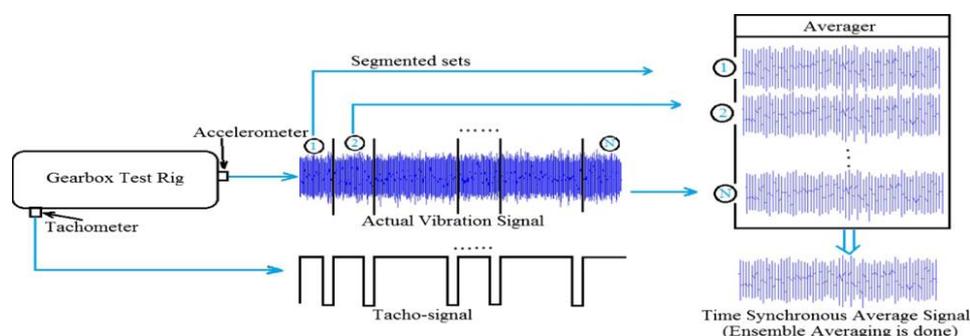
Setelah sinyal getaran direkam, sejumlah teknik pemrosesan sinyal dapat digunakan untuk mengekstraksi fitur yang sensitif dan menarik terkait cacat. Teknik pemrosesan sinyal dapat diklasifikasikan menjadi tiga bentuk yaitu menggunakan domain waktu, domain frekuensi, dan metode domain waktu-frekuensi. Metode-metode ini tidak sepenuhnya independen, dan dalam banyak situasi mereka saling melengkapi. Diperlukan pemilihan metode yang cocok untuk jenis kasus tertentu pada proses pemantauan kondisi (Johsi & Lodwal, 2017).

##### 1. Analisis domain waktu

Teknik yang digunakan dalam pemrosesan sinyal dapat diklasifikasikan sebagai metode domain waktu jika memproses sinyal mentah secara langsung dalam domain waktu tanpa ditransformasikan ke domain lain, seperti domain frekuensi. Tujuan dari analisis domain waktu

adalah untuk menentukan fitur statistik dari sinyal asli dengan memanipulasi serangkaian bilangan diskrit. Dalam teknik ini, parameter statistik seperti standar deviasi (SD) dan *Root Mean Square (RMS)* dapat digunakan untuk memberikan informasi yang berguna tentang cacat tersembunyi yang diwakili dalam sinyal domain waktu.

*Time Synchronous Averaging (TSA)* merupakan salah satu teknik analisis getaran pada domain waktu yang memungkinkan untuk mereduksi efek *noise* dari sebuah sinyal. Untuk aplikasi pada *gearbox*, *TSA* memisahkan getaran dari roda gigi dari getaran sistem yang kompleks yang tidak sinkron dengan roda gigi. Teknik ini membutuhkan pengukuran sinyal "*trigger*", yaitu sinyal kecepatan poros. Pengukuran kecepatan ini biasanya disampaikan oleh tachometer dengan output *pulse per revolution* (Combet & Gelman, 2004). Konsep dari *TSA* ditampilkan pada Gambar 2.14.



**Gambar 2. 14** Konsep *TSA*

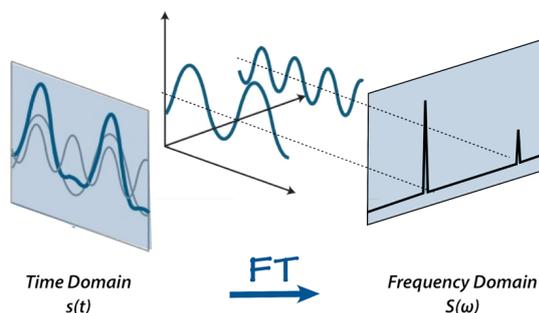
(Sharma & Parey, 2016)

## 2. Analisis domain frekuensi

Pada sebagian besar aplikasi, representasi sinyal dalam domain waktu belum menjadi metode terbaik, karena banyak informasi yang belum bisa disajikan dalam plot domain waktu. Analisis frekuensi memberikan informasi tambahan tentang data deret waktu, dan dapat digunakan untuk menjelaskan spektrum frekuensi yang ada dalam sinyal. Parameter analisis domain frekuensi lebih dapat diandalkan dalam deteksi kerusakan daripada

parameter domain waktu. Namun, sinyal amplitudo waktu dapat diwakili oleh keluarga eksponen kompleks dengan durasi waktu tak terbatas menggunakan *Fourier Transform (FT)*.

*Fourier Transform* merupakan metode yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal getaran domain waktu menjadi sinyal frekuensi yang kompleks. *Fast Fourier Transform* dalam Bahasa Indonesia disebut transformasi fourier cepat, dimana merupakan sumber dari algoritma untuk menghitung *Discrete Fourier Transform (DFT)* dengan cepat dan efisien. Proses transmisi sinyal getaran domain waktu ke domain frekuensi (Spektrum) diperlihatkan pada Gambar 2.15. Pada metode ini spektrum akan memunculkan frekuensi fundamental (frekuensi dasar) dan frekuensi harmoniknya. Analisis yang dilakukan adalah mengidentifikasi frekuensi apa saja yang muncul dalam spektrum.



**Gambar 2. 15** Proses transmisi sinyal getaran domain waktu ke domain frekuensi

(Sumber: <http://mriquestions.com/fourier-transform-ft.html>)

### 3. Analisis domain waktu-frekuensi

Sinyal dari komponen yang rusak memiliki sifat non-stasioner. Namun, jika komponen frekuensi dari sinyal non-stasioner dihitung menggunakan *fourier transform*, hasilnya akan mewakili komposisi frekuensi yang dirata-rata selama durasi dari sinyal. Akibatnya, karakteristik dari sinyal tidak dapat dijelaskan secara maksimal menggunakan transformasi fourier. Oleh karena itu, analisis waktu-frekuensi telah dikembangkan dan diterapkan untuk diagnosis kerusakan

pada mesin karena kemampuannya dalam representasi sinyal yang lebih baik dalam domain frekuensi maupun domain waktu. Fitur unik dari teknik analisis waktu-frekuensi ini cocok untuk sinyal non-stasioner. Selain itu, metode waktu-frekuensi dapat memberikan informasi menarik terkait distribusi energi melalui pita frekuensi. Sejumlah teknik analisis waktu-frekuensi, seperti *Short Time Fourier Transform (STFT)* dan *wavelet transform*, telah digunakan untuk mendeteksi dan mendiagnosis kerusakan pada komponen mesin.

*Wavelet transform* merupakan metode yang menarik dan relatif baru (mulai tahun 1998) dalam analisis getaran domain waktu-frekuensi. *Wavelet transform* mengekspansikan suatu sinyal berdasarkan parameter skala dan dilatasi spatial (Hidayat & Santoso, 2017). Fungsi wavelet melibatkan 2 variabel yaitu skala ( $\sigma$ ) dan translasi ( $\tau$ ). Fungsi *wavelet transform* dinyatakan dalam Persamaan 2.6:

$$\psi_{\sigma,\tau}(t) = \psi(\sigma, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \psi\left(\frac{t-\tau}{\sigma}\right) \dots\dots\dots (2.6)$$

*Continuous Wavelet Transform (CWT)* menggunakan fungsi *wavelet* dengan dua parameter yaitu skala ( $\sigma$ ) dan translasi ( $\tau$ ) yang berubah secara kontinyu. *CWT* dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.7:

$$F_w(s, t') = [f(t), \psi_{s,t'}(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \bar{\psi}\left(\frac{t-t'}{s}\right) dt' \dots (2.7)$$

$f(t)$  merupakan *inner product* dari *CWT*, sedangkan *wavelet* disimbolkan dengan  $\psi$ .  $s$  dan  $t'$  masing-masing menunjukkan parameter skala dan translasi. Output *CWT* dapat diproyeksikan menjadi dua dimensi yaitu sinyal dalam bidang waktu dan skala atau bisa disebut *scalogram*. Sinyal bidang waktu-skala ini dapat diubah menjadi bidang waktu dan frekuensi (*Spectrogram*). Hubungan antara skala dan frekuensi dinyatakan dalam Persamaan 2.8:

$$fa = \frac{fc}{s \cdot TS} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan :

- $f_a$  = Frekuensi perkiraan (Hz)
- $f_c$  = Frekuensi sentral *wavelet* (Hz)
- $s$  = *Scale*
- $T_s$  = *Periode Sampling*

*Morlet Wavelet transform* merupakan keluarga dari *CWT*. *Morlet* adalah jenis *wavelet* yang sering digunakan dalam analisis getaran. Persamaan *Morlet* dinyatakan sebagai berikut:

$$\psi(t) = \left( \frac{\beta}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\beta^2 t^2 / 2} \right) \cdot \cos(\omega_c t) \dots\dots\dots (2.9)$$

Persamaan  $\left( \frac{\beta}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\beta^2 t^2 / 2} \right)$  merupakan fungsi distribusi Gauss  $N(\mu, \sigma)$ , dengan  $\mu = 0$  dan  $1/\sigma = \beta$ .  $\omega_c$  merupakan suku harmonik yang menentukan osilasi. Nilai  $\omega_c$  didapatkan dari  $2\pi f_c$ .