
BAB III

PERAWATAN MESIN BERBASIS DATA GETARAN

3.1 Perawatan Mesin

Dalam dunia industri dewasa ini, perawatan merupakan bagian yang menyatu dengan proses produksi sebagai suatu langkah untuk mencapai keandalan dan kapasitas produksi yang diinginkan. Lebih jauh lagi, dengan dilakukannya perawatan yang tepat maka diharapkan terciptanya kondisi *zero breakdown* dan *zero down time*. Disamping fungsi vitalnya diatas, perawatan menghabiskan hingga 14 % dari total ongkos produksi [3]. Hal ini mensiratkan bahwa proses perawatan harus dilakukan dengan pendekatan yang tepat.

3.1.1 Perawatan Dasar

Perawatan dasar (*basic maintenance*) menangani tiga kondisi fisik utama suatu obyek perawatan yaitu [4]:

- Kekendoran (*looseness*)
- Kontaminasi (*contamination*)
- Pelumasan (*lubrication*)

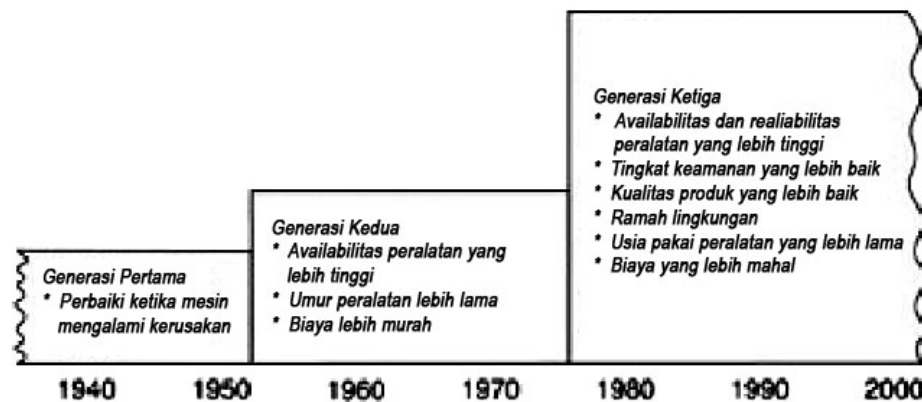
Perawatan dasar memegang posisi paling penting dalam proses perawatan. Kegagalan dalam menjalankan fungsi perawatan dasar akan mengakibatkan kegagalan bagi mesin, baik itu berupa penurunan prestasi, kegagalan beroperasi bahkan kerusakan komponen. Penerapan metode perawatan yang lebih canggih seperti *preventive maintenance* atau *predictive maintenance* tidak akan efektif tanpa disertai perawatan dasar yang benar.

Contoh kegagalan yang dapat terjadi yakni [4], kebersihan sistem udara, bahan bakar, pelumasan, dan pendinginan yang sangat buruk menyebabkan terjadinya kepanasan pada mesin yang dapat mengakibatkan kerusakan komponen-komponennya seperti katup, bantalan, retak-pecah pada daerah yang memiliki temperatur kerja yang sangat tinggi; tersumbatnya saluran pelumasan (karena tidak dibersihkan secara sempurna) menyebabkan kerusakan-kerusakan bantalan; tersumbatnya udara masuk (karena

tidak digantinya filter udara) dapat menyebabkan kepanasan dan turunnya efisiensi termalnya.

3.1.2 Perkembangan Metode Perawatan

Metode perawatan berkembang seiring dengan perkembangan teknologi dan permasalahan sosial-ekonomi. Lebih lanjut harapan-harapan dari perawatan dapat diamati pada Gambar 3. 1.



Gambar 3. 1 Perkembangan karakteristik perawatan [5].

Metode yang di gunakan telah berkembang mulai dari perawatan generasi pertama (*breakdown maintenance*), ke generasi kedua (*preventive maintenance*) yang menekankan pada inspeksi dan penggantian secara berkala dan memanfaatkan penjadwalan perawatan menggunakan komputer, ke perawatan generasi ketiga yang menekankan pada kondisi mesin sebagai acuan untuk melakukan kegiatan perawatan.

1) *Run to Breakdown*

Metode ini digunakan saat perawatan generasi pertama. Peralatan dioperasikan selama tidak ada kerusakan. Perawatan yang diberikan hanya seperlunya saja. Perbaikan hanya dilakukan ketika mesin telah mengalami kerusakan. *Run to breakdown* ini dilandasi keyakinan akan kecenderungan gagal terjadi ketika peralatan menjadi tua, seperti yang diilustrasikan Gambar 3. 1.



Gambar 3. 2 Kecenderungan kegagalan peralatan.

Metode *run to breakdown* akan menghabiskan biaya yang paling besar jika dibandingkan dengan metode lain. Selain itu *downtime* yang lama juga menyebabkan kerugian berkaitan dengan proses produksi yang terganggu, apalagi jika kerusakan terjadi pada mesin yang vital.

Aplikasi metode ini hanya cocok untuk mesin-mesin yang sederhana dan tidak vital. Penerapan pada mesin-mesin vital akan berakibat pada terhentinya proses produksi, terjadinya kerusakan yang fatal, perambatan kerusakan dan pengadaan suku cadang yang mahal.

2) Perawatan Preventif

Perawatan preventif atau disebut juga perawatan berbasis waktu. Ciri khasnya adalah dilakukannya *overhaul* pada interval yang tetap. Tujuan utama perawatan preventif ini adalah mengurangi *downtime* yang sangat merugikan bagi industri. Perawatan preventif dilandasi keyakinan akan pola kerusakan berdasarkan kurva “bak mandi”, seperti yang ditunjukkan Gambar 3. 2.



Gambar 3. 3 Kurva “bak mandi”.

Overhaul dilakukan secara reguler dengan interval dilandasi oleh pengetahuan akan kondisi mesin dan komponen-komponennya. Pada saat *overhaul* ini, komponen-komponen yang usia pakainya diperkirakan sudah habis diganti. Perkiraan ini berdasarkan data statistik umur pakai dari produsen yang bersangkutan.

Dengan menggunakan perawatan preventif ini, biaya perawatan dapat ditekan (dibandingkan *run to breakdown*). Selain itu lama *downtime* yang terjadi dapat dikurangi sehingga produktivitas meningkat.

Keterbatasan dari metode ini adalah dengan adanya jadwal *overhaul* yang ketat, memungkinkan munculnya kesalahan saat *overhaul* yang berpotensi menimbulkan kerusakan terhadap mesin dengan kondisi semula yang baik. Selain itu pemilihan umur komponen yang dilandasi data statistik yang tidak tepat atau memiliki deviasi yang besar akan menimbulkan *overmaintained* atau *undermaintained*.

3) Perawatan Prediktif

Predictive maintenance atau biasa disebut *condition based maintenance*, berlawanan dengan *time based maintenance* istilah lain untuk *preventive maintenance*, memiliki kemampuan untuk menaksir kondisi mesin dan secara signifikan memodifikasi implementasi *interval-based* atau *time-based maintenance* [3].

Tujuan dari *predictive maintenance* adalah mengeliminasi *breakdown* mesin dengan penerapan teknologi dengan mengukur kondisi mesin, mengidentifikasi kemungkinan adanya kegagalan yang sedang berlangsung dan memprediksi kapan sebaiknya dilakukan koreksinya. Ini dimungkinkan karena kegagalan selalu diawali dengan

suatu pertanda yang pada dasarnya dapat dideteksi dengan sensor tertentu tergantung dari fenomena fisik atau kimia penyebabnya. Ini bisa mencakup getaran, panas, pengurangan ketebalan, partikel keausan, dan sebagainya[3].

Dengan penerapan teknologi prediktif, maka produktivitas diharapkan meningkat seiring dengan menurunnya *downtime*. Selain itu dengan perencanaan kebutuhan perawatan yang tepat, maka biaya perawatan dapat diturunkan mengingat kondisi dari tiap-tiap suku cadang dapat diketahui sehingga pembelian komponen yang tidak diperlukan dan penggantian komponen yang masih baik dapat dihindari.

Didalam melakukan inspeksi periodik untuk memprediksi kondisi mesin, berbagai parameter dapat digunakan antara lain vibrasi, analisis oli, termografi, ferrografi, dan lain-lain.

3.2 Getaran Mesin Dalam Perawatan Prediktif

Pemantauan kondisi mesin berbasis data getaran merupakan salah satu metode yang paling populer dan efektif. Metode ini didasarkan atas pengertian bahwa tiap kondisi mesin akan memiliki sinyal getaran yang unik, sehingga tiap kerusakan akan membangkitkan sinyal getaran unik yang disebut pula dengan *signature*. Melalui analisis sinyal getaran ini bisa ditentukan kondisi mesin tanpa membongkar mesin yang bersangkutan, sehingga proses produksi dapat terus berlangsung. Pemantauan getaran mesin secara berkala akan memungkinkan untuk mendeteksi kondisi tidak normal sedini mungkin sehingga kerusakan yang lebih parah dapat dihindari.

Pada *predictive maintenance*, perbaikan mesin diatur berdasarkan kondisi mesin. Analisis getaran dapat dijadikan landasan yang efektif dalam menentukan kondisi mesin tersebut. Berdasarkan analisis tersebut dapat diketahui apabila ada kerusakan yang terjadi pada mesin berikut penyebabnya, sehingga perbaikan dapat dijadwalkan dengan baik. Jadwal diatur sebisa mungkin tanpa mengganggu proses produksi. Pemeriksaan dilakukan pada bagian yang dicurigai mengalami kerusakan berdasarkan analisis getaran. Hal ini akan mempersingkat waktu dan kerja yang diperlukan. Analisis yang baik juga akan menghindari dari pembongkaran komponen-komponen dengan performansi baik yang beresiko terjadinya kerusakan akibat

kesalahan manusia selama pembongkaran dan pemasangan kembali. Suku cadang dapat dipersiapkan sebelum jadwal perbaikan. Hal ini sangat menguntungkan mengingat waktu tunggu datangnya suku cadang dapat ditekan, demikian pula pengaturan persediaan suku cadang dapat dilakukan dengan lebih baik.

Tabel 3. 1 Batas atas tingkat getaran menurut ISO

Tingkat getaran		Jenis tumpuan	
In./detik	mm/detik	Tumpuan keras	Tumpuan lunak
0,017	0,45	bagus	bagus
0,028	0,71		
0,044	1,12		
0,071	1,8	memuaskan	memuaskan
0,11	2,8		
0,18	4,5	tidak memuaskan	tidak memuaskan
0,28	7,1		
0,44	11,2	tidak diijinkan	tidak diijinkan
0,71	18,0		
1,10	28,0		
2,80	71,0		

Tingkat getaran diukur secara berkala dan didokumentasikan dengan baik. Hasil pengukuran tingkat getaran tersebut dibandingkan dengan batas atas tingkat getaran (*vibration severity limit*). Tabel 3. 1 menunjukkan contoh batas atas tingkat getaran ini. Jika data batas atas tingkat getaran tersebut tidak tersedia, maka data tingkat getaran disaat mesin beroperasi dengan baik pada berbagai kondisi operasi (*baseline vibration spectral*) dapat dijadikan acuan. Demikian pula catatan sejarah perawatan mesin tersebut merupakan landasan yang penting dalam analisis getaran. Catatan ini dapat berupa jenis kerusakan yang terjadi berikut spektrum getaran sebelum dan sesudah perbaikan. Adanya catatan sejarah perawatan mesin yang lengkap, memungkinkan proses identifikasi yang cepat ketika kerusakan yang sama terulang kembali. Perubahan tingkat getaran yang mengkhawatirkan dapat diketahui dengan segera dan analisis terhadap getaran-getaran yang bukan dibangkitkan oleh kerusakan dapat dihindari.

Frekuensi karakteristik dari mesin dapat diperhitungkan berdasarkan data teknis dari komponen mesin, sehingga respon getaran mesin tersebut dapat diperkirakan. Contohnya pada bantalan gelinding, frekuensi getaran akibat kerusakan tertentu pada

komponen ini dapat dihitung dengan rumus dengan pengetahuan akan geometri dan dimensinya. Hal yang serupa juga dijumpai pada beberapa elemen mesin lainnya, seperti roda gigi.

Pengetahuan tentang prinsip kerja mesin dan karakteristiknya sangat menunjang dalam melakukan analisis getaran. Rancangan dan karakteristik operasi mesin menentukan jenis kerusakan yang mungkin terjadi dan respon getaran terhadap kerusakan tersebut.[6]

Perubahan kondisi operasi mesin seperti kecepatan, beban dan temperatur akan menyebabkan perubahan karakteristik getaran mesin. Hal ini perlu dicermati dalam melakukan analisis, terutama ketika melakukan perbandingan respon getaran. Perubahan karakteristik getaran mesin akibat perubahan kondisi operasi ini dapat juga digunakan dalam analisis menentukan sumber kerusakan, karena perubahan respon getaran tiap kerusakan terhadap perubahan kondisi bisa berbeda.

3.3 Metode Analisis Getaran

3.3.1 Domain Waktu dan Domain Frekuensi

Sinyal getaran yang diperoleh melalui pengukuran merupakan sinyal hasil penjumlahan berbagai respon getaran yang terjadi pada mesin. Getaran-getaran ini bisa disebabkan oleh gaya eksitasi dari dalam mesin itu sendiri atau dari sumber lain yang berada sekitarnya. Didalam melakukan analisis, Sinyal hasil pengukuran ini akan diuraikan atas getaran – getaran penyusunnya. Kemudian baru dapat ditentukan penyebab dari getaran-getaran tersebut berdasarkan karakteristiknya.

Terdapat dua domain didalam melakukan analisis getaran ini, yakni domain waktu dan domain frekuensi. Domain waktu menampilkan nilai simpangan terhadap waktu. Adapun domain frekuensi menunjukkan nilai amplitudo terhadap frekuensi.

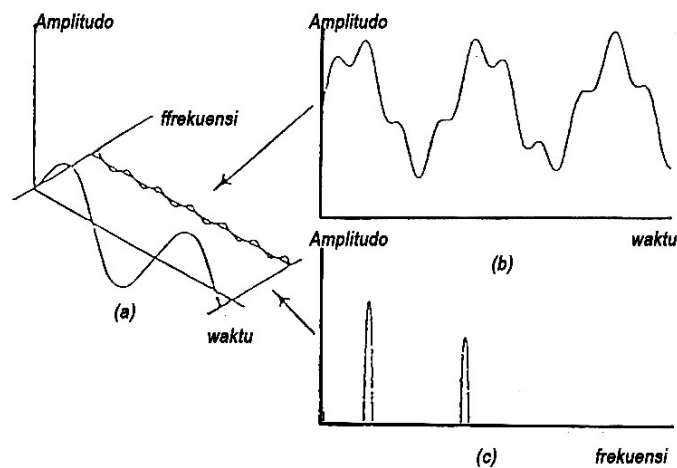
Domain Waktu

Domain waktu memperlihatkan perubahan simpangan getaran terhadap waktu. Tampilan ini bisa dilihat melalui osiloskop. Pada domain ini gambaran fisik dari

getaran terlihat jelas dan memungkinkan untuk memperlihatkan hubungan fase antara sinyal. Analisis sinyal impuls lebih sesuai dilakukan dalam domain ini. Untuk analisis getaran yang terdiri dari banyak komponen, maka analisis getaran pada domain ini menjadi sulit, karena yang terlihat hanyalah penjumlahan simpangan dari setiap komponen penyusunnya saja. Sulit untuk melihat komponen penyusunnya. Dalam hal inilah domain frekuensi akan berperan.

Domain Frekuensi

Domain frekuensi menampilkan pemetaan nilai amplitudo terhadap frekuensi. Dengan domain ini akan terlihat getaran-getaran penyusun suatu sinyal kompleks dengan lebih jelas, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3. 4.

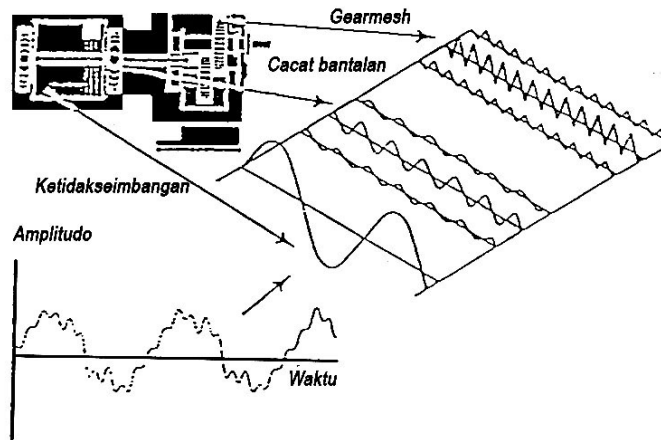


Gambar 3. 4 Getaran dalam domain waktu dan frekuensi [6].

Landasannya adalah teori transformasi fourier oleh Jean Baptiste Fourier. Teori ini menyatakan bahwa tiap sinyal harmonik kompleks dapat diuraikan atas sederetan gelombang sinus sederhana. Gelombang sinus ini umumnya akan memiliki amplitudo dan frekuensi yang berbeda-beda. Penjumlahan dari gelombang-gelombang sinus tersebut akan membentuk kembali sinyal harmonik kompleks tersebut.

Sinyal getaran mesin merupakan akumulasi dari berbagai getaran yang ada pada mesin, misalnya ketidak seimbangan, ketidaklurusan dan kerusakan-kerusakan lainnya. Sinyal ini memiliki bentuk yang sulit untuk diinterpretasikan. Dengan adanya

transformasi fourier, sinyal ini dapat diuraikan atas komponen penyusunnya, seperti yang terlihat pada Gambar 3. 5.



Gambar 3. 5 Domain frekuensi dari getaran suatu mesin [6].

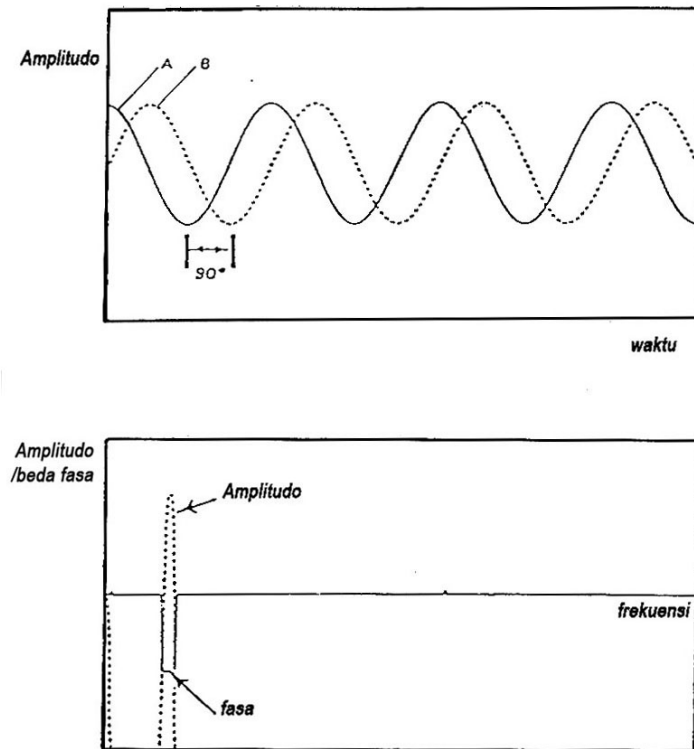
Pengembangan dari teori ini dikenal dengan Fast Fourier Transformation (FFT). Gelombang sinyal kompleks diperoleh dari transduser menggunakan FFT spectrum analyzer. Kemudian menggunakan algoritma FFT, perhitungan deret sinus penyusun gelombang kompleks tersebut dilakukan lalu ditampilkan dalam bentuk amplitudo pada sumbu frekuensi. Pada transformasi fourier, getaran acak tidak dapat diwakilkan dengan gelombang sinus pada satu frekuensi saja. Amplitudo akan tampil pada seluruh rentang frekuensi.

3.3.2 Spektrum Fase

Spektrum fase melengkapi spektrum amplitudo dalam menampilkan suatu domain frekuensi. Spektrum fase menunjukkan hubungan fase antara komponen getaran. Gambaran yang lebih jelas mengenai hubungan fase antara sinyal ini dapat dilihat melalui sinyal-sinyal tersebut pada domain waktu, seperti yang terlihat pada Gambar 3. 6 (atas), adapun beda fase pada domain frekuensi dapat dilihat pada Gambar 3. 6 (bawah).

Spektrum fase digunakan dalam teknik balansir dan untuk membedakan antara kerusakan yang memiliki spektrum amplitudo yang serupa, misalnya dalam

membedakan antara kerusakan akibat ketidakseimbangan massa atau akibat ketaksesumbuan. Spektrum fase juga dapat menunjukkan getaran yang sinkron dengan putaran atau tidak. Getaran yang sinkron dengan putaran akan memiliki fase konstan, pada kondisi sebaliknya akan ditemui fase yang tidak konstan.



Gambar 3. 6 Beda fase pada domain waktu (atas) dan frekuensi (bawah) [6].

Fase harus dinyatakan terhadap suatu acuan. Untuk itu, dipergunakan *keyphasor* sebagai sensor putaran acuan pengukuran sudut fase. *Keyphasor* bisa berupa transduser perpindahan yang akan merasakan adanya alur pasak berfungsi sebagai pemicu.

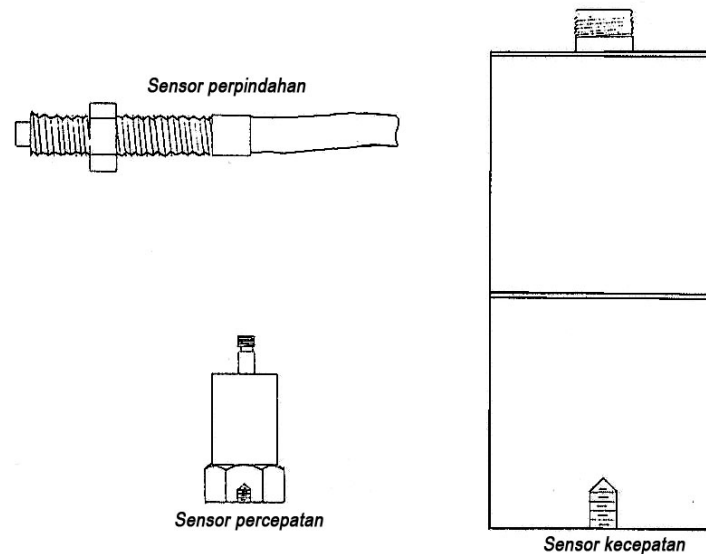
3.3.3 Peta Spektral

Peta spektral merupakan suatu seri spektrum getaran yang diukur pada kecepatan mesin yang berbeda. Selain kecepatan, parameter lainnya seperti waktu, beban dan suhu dapat pula dijadikan dimensi ketiga untuk peta spektral ini. Peta spektral akan menunjukkan hubungan antara parameter ini terhadap spektrum getaran.

Peta spektral dengan kecepatan mesin sebagai sumbu ketiga dapat menunjukkan komponen getaran yang berhubungan dengan kecepatan putar. Komponen getaran ini akan bergeser kekanan ketika putaran mesin dinaikkan. Komponen getaran yang tidak berhubungan dengan kecepatan putar akan berada tetap pada frekuensinya, contohnya komponen getaran akibat resonansi.

3.4 Tranduser

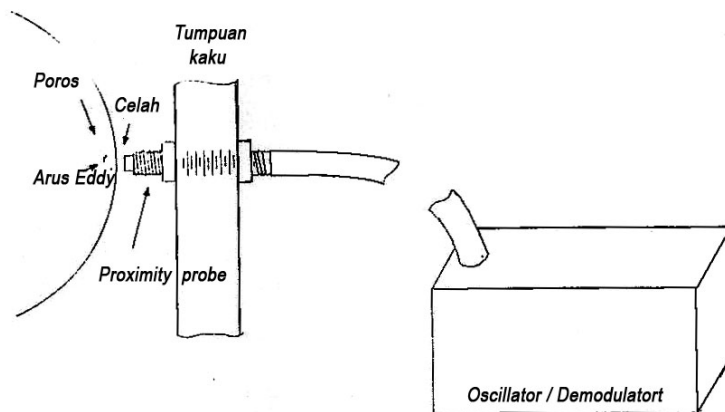
Tranduser adalah peralatan yang digunakan untuk mengubah gerakan mekanik dari getaran menjadi sinyal elektrik [7]. Tranduser umumnya dibagi atas 3 jenis, yaitu : perpindahan (*displacement*), kecepatan (*velocity*) dan percepatan (*acceleration*), ilustrasi pada Gambar 3. 7.



Gambar 3. 7 Tranduser perpindahan, kecepatan, dan percepatan [7].

3.4.1 Tranduser Perpindahan

Tranduser perpindahan biasanya berupa *proximity probe*. Prinsip kerjanya berdasarkan pada efek arus eddy dengan cara menggunakan sinyal sinusoidal frekuensi tinggi. Gerak relatif poros terhadap permukaan sensor ini mengubah besar arus eddy tersebut yang memodulasi sinyal sinusoidal ini. Osilator/demodulator akan mendemodulasi sinyal tersebut sehingga menghasilkan sinyal berupa tegangan listrik yang sebanding dengan gerak relatif poros. Untuk lebih jelas dapat dilihat ilustrasi pada Gambar 3. 8.



Gambar 3. 8 Tranduser perpindahan [7].

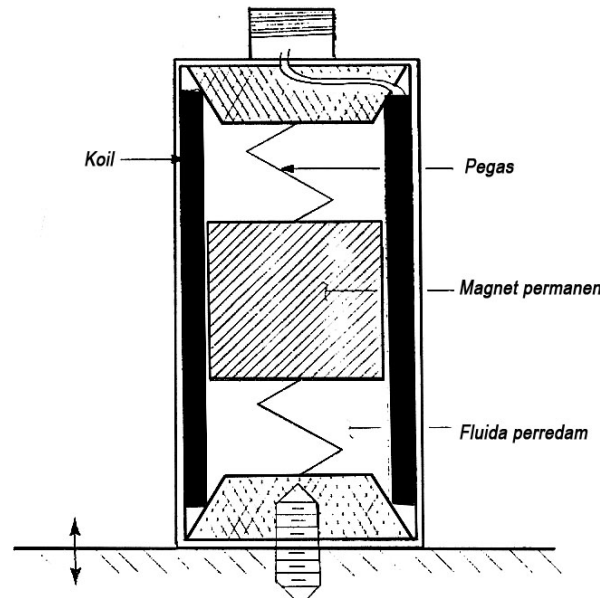
Tranduser ini tidak memerlukan kontak langsung dengan bagian yang bergetar sehingga dapat diaplikasikan pada objek yang tidak bisa mentoleransi adanya massa tambahan (terutama untuk objek yang tipis dan ringan). Tanpa adanya bagian yang bergerak, maka tidak terdapat keausan pada tranduser. Rentang pengukurannya yakni 10 – 90 mil dan rentang frekuensi berkisar 0 – 1500 Hz [7].

Proximity probe memiliki beberapa keterbatasan. Selain terhadap jarak relatif, *proximity probe* juga sensitif terhadap cacat pada permukaan serta adanya variasi dalam konduktivitas dan permeabilitas. Ketidak-bundaran poros juga turut mempengaruhi hasil pengukuran. Sehingga hasil pengukuran merupakan akumulasi dari perpindahan relatif dan variasi permukaan. Oleh sebab itu poros yang hendak diukur haruslah terbuat dari bahan yang konduktif terhadap listrik, permukaannya halus dengan cacat permukaan yang minimum. Jarak antara tranduser-poros dan tegangan keluaran harus diatur dan kalibrasi harus dilakukan. Instalasi yang relatif sulit juga menjadi kendala penggunaan tranduser ini.

3.4.2 Tranduser Kecepatan

Tranduser kecepatan terdiri atas massa internal yang berupa magnet permanen, pegas, fluida peredam dan kumparan, Gambar 3. 9 memperlihatkan gambar tranduser kecepatan ini. Getaran pada objek yang ingin diukur akan membuat kumparan turut bergetar, sementara massa internal (magnet permanen) akan tetap diam. Gerakan

relatif antara kumparan dan magnet permanen akan menghasilkan beda tegangan yang proporsional terhadap kecepatan. Transduser ini dapat menghasilkan sinyal analog getaran dalam besaran tegangan listrik tanpa memerlukan catu daya. Sinyal keluaran tidak memerlukan pengkondisian sinyal sehingga dapat langsung dihubungkan dengan instrumen pembaca.



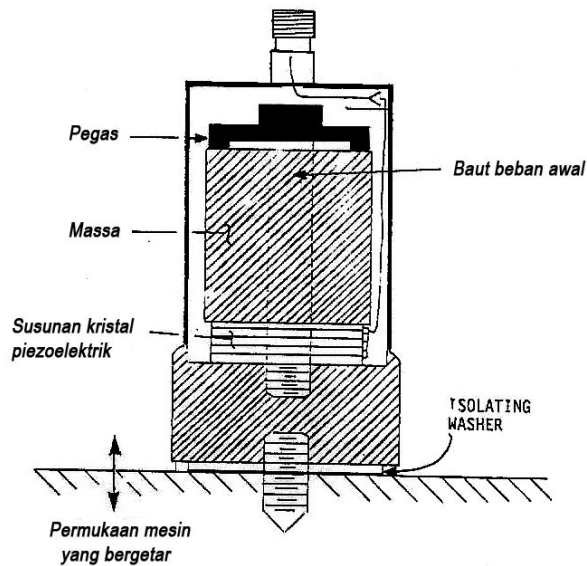
Gambar 3. 9 Transduser kecepatan [7].

Frekuensi natural dari transduser kecepatan ini berkisar 8 Hz. Wilayah operasinya berada diatas frekuensi naturalnya yakni antara 10 Hz – 1500 Hz. Pada rentang frekuensi ini transduser kecepatan memiliki keluaran yang linear.

Keterbatasan transduser ini antara lain ukurannya yang relatif besar. Penggunaan pada objek berukuran kecil akan memberikan penambahan massa yang dapat mempengaruhi getaran objek tersebut. Adanya bagian dalam yang bergerak bisa menyebabkan terjadinya kegagalan. Kumparan yang ada pada transduser ini akan membuatnya sensitif terhadap medan elektromagnetik eksternal. Kumparan ini akan mendeteksi adanya gelombang elektromagnetik dan menambahkannya kedalam sinyal getaran. Penjumlahan sinyal tersebutlah yang akan terbaca pada instrumen pembaca. Dengan demikian, penggunaan transduser ini harus memperhatikan medan elektromagnet yang ada, misalnya pada motor-motor besar.

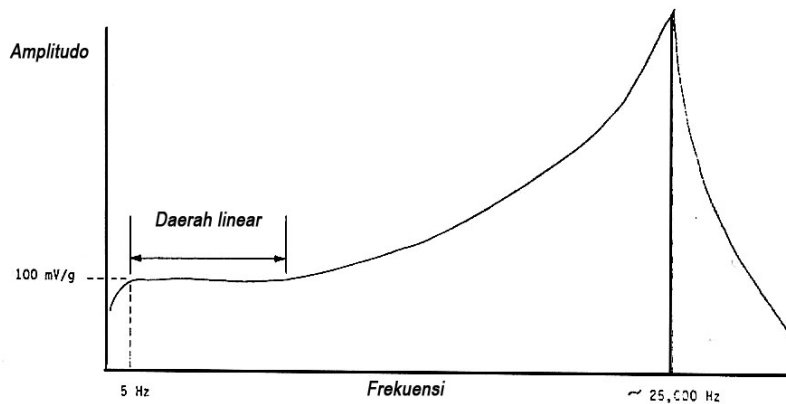
3.4.3 Tranduser Percepatan (*Accelerometer*)

Jenis *accelerometer* yang populer adalah tipe piezoelektrik. Terdiri atas kristal kwarsa (atau barium titanate) dengan massa. Tranduser ini bekerja memanfaatkan efek piezoelektrik, yaitu munculnya muatan listrik pada permukaan keping piezoelektrik karena adanya tekanan yang bekerja pada permukaannya. Gambar tranduser percepatan ini dapat dilihat pada Gambar 3. 10.



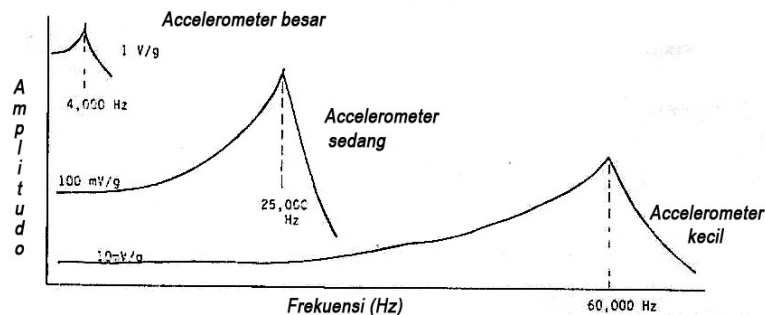
Gambar 3. 10 Tranduser percepatan [7].

Berbeda dengan tranduser kecepatan yang beroperasi diatas frekuensi naturalnya, *accelerometer* justru beroperasi dibawah frekuensi natural. Karena kekakuan dari kristal dan juga pegasnya, nilai frekuensi natural pada *accelerometer* mencapai 25.000 kHz. Responnya linear sekitar sepertiga dari wilayah ini. Sehingga jangkauan frekuensi dari *accelerometer* berkisar 5 sampai dengan sekitar 10.000 Hz, bergantung pada ukurannya. Gambar 3. 11 menunjukkan grafik sensitivitas terhadap frekuensi dari sebuah *accelerometer*, terlihat wilayah linear dari sensitivitas *accelerometer* yang luas.



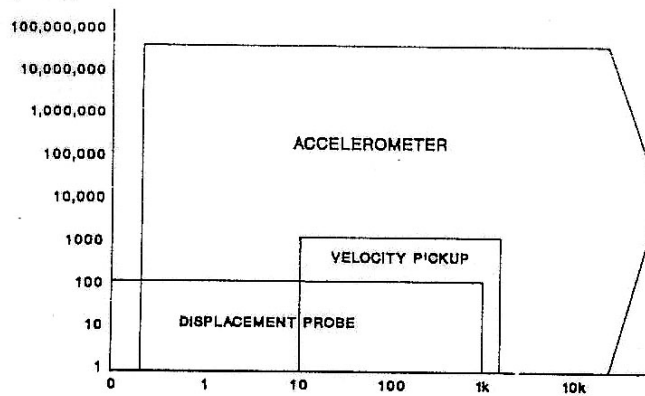
Gambar 3. 11 Grafik sensitivitas terhadap frekuensi suatu *accelerometer* [7].

Sensitivitas dan respon frekuensi dari *accelerometer* sangat bergantung pada ukurannya. *Accelerometer* berukuran kecil (dengan massa dan kristal yang kecil) memiliki sensitivitas yang rendah namun rentang frekuensi kerjanya luas mengingat frekuensi naturalnya yang tinggi (beberapa hingga diatas 50.000 Hz). Adapun *accelerometer* berukuran besar akan memiliki sensitivitas yang tinggi dengan rentang frekuensi kerja yang lebih rendah (bahkan hingga 800 – 1000 Hz)[7]. Perbandingan sensitivitas ini dapat diamati pada Gambar 3. 12.



Gambar 3. 12 Grafik sensitivitas terhadap frekuensi *accelerometer* dengan ukuran berbeda [7].

Diantara dua jenis transduser lainnya, *accelerometer* memiliki keunggulan-keunggulan. Yang utama adalah ukurannya yang kecil, memiliki respon frekuensi yang luas dan rentang dinamik yang luas. Rentang dinamik ini diartikan bahwa, transduser mampu mendeteksi getaran yang sangat kecil dan tidak rusak terhadap getaran yang besar. Gambar 3. 13 memberikan visualisasi akan hal ini.



Gambar 3. 13 Jangkauan dinamik dan respon frekuensi dari transduser umumnya [7].

3.5 Karakteristik Getaran Kerusakan Mesin

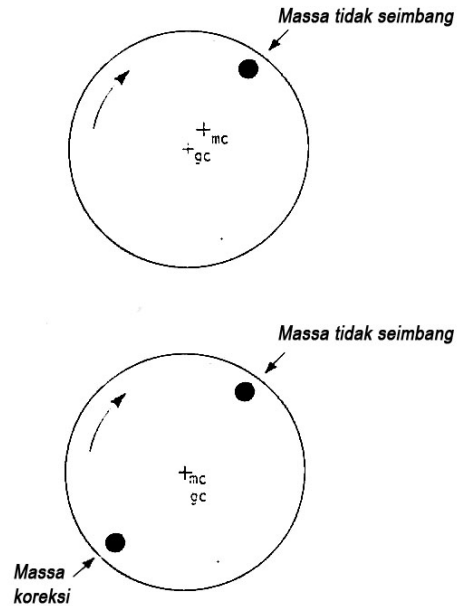
Permasalahan pertama dalam persoalan menyangkut getaran dan *noise* adalah mengidentifikasi dan menentukan lokasi sumbernya. Identifikasi sumber berarti melakukan analisis frekuensi untuk menandai frekuensi yang mengkhawatirkan, dan mencari sumbernya dengan melacak frekuensi ini menuju asalnya. Pengukuran amplitudo dapat dilakukan untuk menentukan batasannya [7]. Untuk dapat melakukan hal diatas, diperlukan keahlian dalam melakukan analisis getaran. Tidak semua permasalahan getaran dapat diketahui penyebabnya dengan jelas. Terutama persoalan yang menyangkut kerusakan pada kondisi yang berbeda dengan kerusakan lain, sehingga memungkinkan terdapat parameter-parameter operasi tertentu yang belum dijumpai sebelumnya.

3.5.1 Getaran Akibat Ketidakseimbangan Massa

Ketidakseimbangan massa adalah salah satu penyebab utama getaran pada mesin. Ketidakseimbangan ini terjadi ketika pusat massa tidak berimpitan dengan pusat perputaran, seperti yang digambarkan pada Gambar 3. 14. Adanya jarak antara pusat massa dan pusat perputaran dapat dimaklumi mengingat tidak ada material yang memiliki distribusi massa yang benar-benar homogen. Kombinasi dari seluruh variabel kerapatan massa ini seolah-olah terdapat sebuah massa pada jarak tertentu dari pusat perputaran. Massa ini akan membangkitkan gaya sentrifugal pada rotor. Gaya ini dirumuskan :

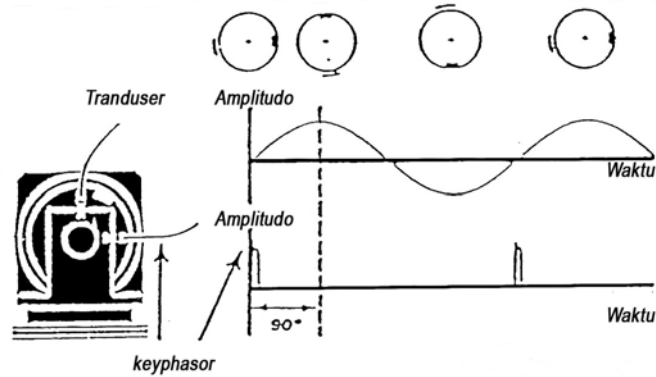
$$F = mr\omega^2$$

F = gaya sentrifugal
 m = massa tak seimbang
 r = radius massa tak seimbang
 ω = kecepatan rotor



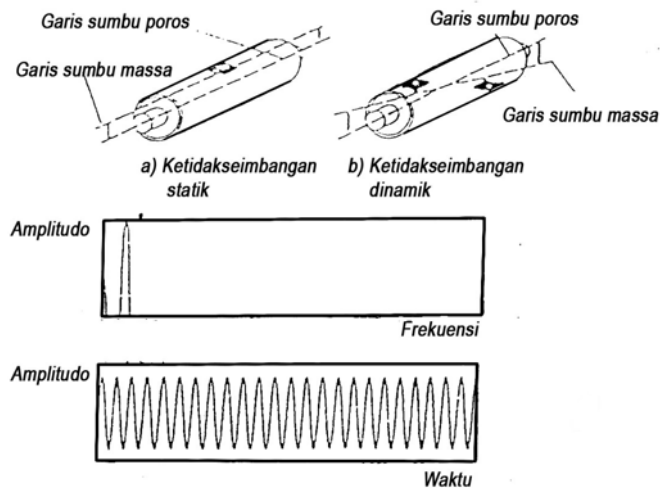
Gambar 3. 14 Ketidakseimbangan massa pada poros. Penambahan massa koreksi dengan arah berlawanan akan membuat pusat massa berimpit dengan pusat perputaran.

Gaya sentrifugal akan membangkitkan sinyal getaran sinusoidal pada frekuensi yang sama putaran mesin dan amplitudo yang proporsional dengan besarnya ketidakseimbangan, seperti pada Gambar 3. 15. Amplitudo getaran akan bertambah seiring dengan kenaikan putaran mesin. Ini dikarenakan gaya sentrifugal akan membesar jika putaran mesin dinaikkan.



Gambar 3. 15 Getaran akibat ketidakseimbangan massa [6].

Ketidakseimbangan dapat terjadi pada satu bidang, dinamakan dengan ketidakseimbangan statik (*static unbalance*) sedangkan ketidakseimbangan pada beberapa bidang disebut dengan ketidakseimbangan kopel (*couple unbalance*). Kombinasi keduanya disebut ketidakseimbangan dinamik (*dynamic unbalance*). Gambar 3. 16 menunjukkan ketidakseimbangan statik dan dinamik.



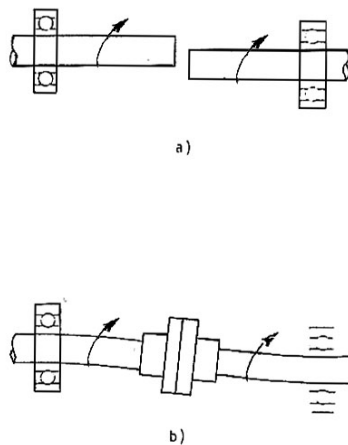
Gambar 3. 16 Ketidakseimbangan statik dan dinamik [6].

Beberapa kerusakan sering diduga bersumber dari rotor yang tak balans. Sinyal yang dibangkitkan rotor tak balans berupa getaran sinusoidal murni dengan frekuensi satu per putaran, kadang-kadang disertai dengan harmonik tingkat rendahnya. Sinyal

karena kerusakan yang sering disangka berasal dari rotor tak balans biasanya mempunyai harmonik tingkat tinggi. Tetapi perlu diingat bila gaya tak balansnya besar, maka harmonik tingkat tinggi dapat terjadi. Hal yang sama terjadi juga bila kekakuan bantalan dalam arah vertikal dan horizontal jauh berbeda. Karena gaya tak balans merupakan vektor berputar, maka fase getarannya relatif terhadap *keyphasor* tergantung pada lokasi transdusernya. Amplitudo dalam hal ini akan berubah sedikit. Pemindahan transduser sebesar 90° menghasilkan perubahan fase sebesar 90° pula, sementara amplitudo hampir tidak berubah [6].

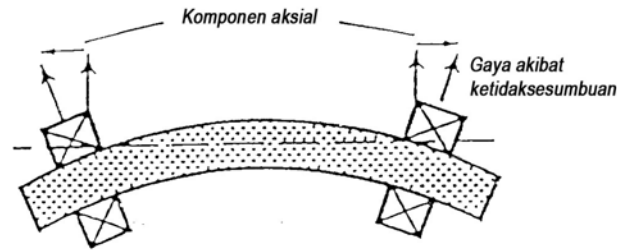
3.5.2 Ketidaklurusan (*Misalignment*)

Ketidaklurusan pada kopling terjadi ketika poros penggerak tidak berada pada satu sumbu dengan poros yang digerakkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. 17. Kerusakan ini juga bisa timbul akibat *preload* dari poros bengkok atau bantalan yang tidak mapan. Ketidaklurusan bisa berupa ketidaklurusan paralel dan angular.



Gambar 3. 17 Ketidaklurusan pada poros [7].

Kerusakan ini akan tampak pada domain frekuensi berupa komponen getaran pada kecepatan putar dan deret harmoniknya. Nilai harmonik pada frekuensi dua kali putaran poros biasanya lebih besar relatif terhadap harmonik lainnya. Komponen gaya juga muncul dalam arah aksial menyebabkan getaran aksial menjadi relatif besar. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3. 18.



Gambar 3. 18 Komponen gaya pada ketidaklurusan [6].

Ciri lain dari ketidaklurusan adalah adanya beda fase sebesar 180° bila diukur getaran pada ujung-ujung poros. Beda fase 180° ini berlaku untuk rotor kaku. Dinamika dari mesin mempengaruhi nilai beda fase ini. Tetapi adanya beda fase yang signifikan menunjukkan kemungkinan terjadinya ketidaklurusan ini.

Ketidaklurusan bergantung pada temperatur. Mesin mengalami perubahan temperatur ketika mesin menuju temperatur operasi. Saat tersebut terjadilah pergerakan yang sangat lambat dari mesin sebagai akibat pemuaian. Pergerakan ini mengubah kondisi kesesumbuan, yang akhirnya akan mengubah getaran yang terjadi terutama pada harmoniknya. Perubahan harmonik selama perubahan temperatur merupakan indikasi kuat terjadinya ketidaklurusan ini.

Ketidaklurusan memiliki karakter getaran yang agak mirip dengan ketidakseimbangan massa. Perbedaannya sebagai berikut :

Ketidakseimbangan

- Amplitudo tinggi pada satu kali putaran mesin.
- Getaran dalam arah aksial rendah.
- Satu fase dengan putaran mesin.
- Komponen getaran tidak bergantung pada temperatur.
- Bergantung pada kecepatan putar mesin.

Ketidaklurusan

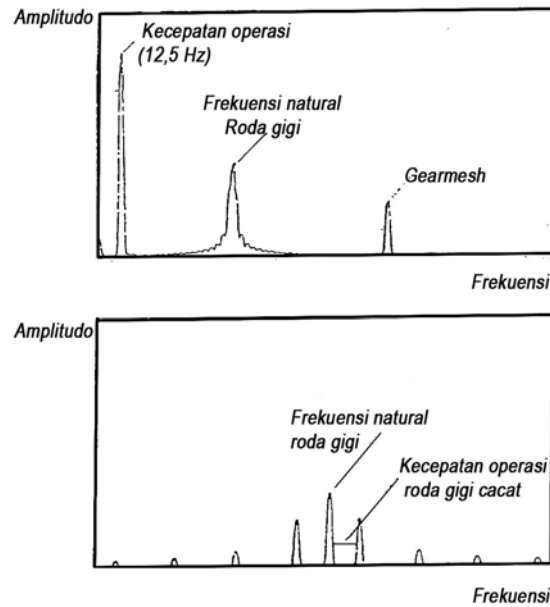
- Amplitudo tinggi pada harmonik satu kali putaran mesin.
- Getaran dalam arah aksial tinggi.
- Berbeda fase sekitar 180° .

- Komponen getaran bergantung pada temperatur.
- Tidak sensitif terhadap perubahan kecepatan. Gaya akibat ketidaklurusan tetap konstan terhadap perubahan kecepatan.

3.5.3 Roda Gigi

Adanya sebuah cacat pada satu gigi akan menyebabkan naiknya tingkat getaran pada 1x kecepatan putar. Ini dapat dilihat pada domain waktu, setiap kali bagian yang cacat melakukan kontak, maka amplitudo getaran akan membesar. Kesulitan dalam mendeteksi kerusakan ini adalah perubahan yang disebabkan terhadap getaran mesin terlalu kecil, mengingat banyaknya sumber getaran yang terlibat.

Getaran akibat cacat pada satu gigi ini akan memodulasi frekuensi *gear-mesh*. Besarnya frekuensi *gear-mesh* adalah kecepatan putar roda gigi dikali dengan jumlah gigi. Roda gigi yang berpasangan akan memiliki frekuensi *gear-mesh* yang sama. Frekuensi *gear-mesh* yang termodulasi akan memiliki *sidebands* kecepatan putar. *Sidebands* pada frekuensi *gear-mesh* ini mengandung informasi penting terhadap kondisi individual gigi pada roda gigi, termasuk jika terjadi *backlash* dan eksentrisitas. Amplitudo getaran pada frekuensi *gear-mesh* akan bervariasi, tergantung dari bebannya. Untuk itu, dalam melakukan perbandingan antara nilai amplitudo getaran pada frekuensi *gear-mesh* hendaklah dilakukan dengan pembebanan yang sama. Adanya *baseline vibration spectral* saat roda gigi beroperasi dengan bagus akan mempermudah analisis. Gambaran getaran pada frekuensi *gear-mesh* roda gigi dapat dilihat pada Gambar 3. 19 (atas).



Gambar 3. 19 Getaran yang bersumber dari roda gigi [6].

Cacat besar pada roda gigi akan menimbulkan impuls yang bisa mengeksitasi frekuensi natural roda gigi, seperti yang terlihat pada Gambar 3. 19 (bawah) . Adanya *sidebands* pada frekuensi natural ini mengindikasikan adanya kerusakan pada roda gigi dengan kecepatan putar sebesar *sidebands*. Mengetahui nilai frekuensi natural roda gigi sangat penting dalam hal ini dan perlu diusahakan dengan berbagai cara.

3.5.4 Bantalan Gelinding

Bantalan merupakan komponen yang lazim dimonitor melalui perawatan prediktif. Kerusakan pada bantalan dapat diramalkan beberapa bulan sebelumnya. Penyebab utama kerusakan pada bantalan yaitu [7] :

1. Kontaminasi, bisa berupa air atau kotoran.
2. Tegangan yang berlebihan (*over stress*)
3. Kurangnya pelumasan
4. Cacat yang terbentuk setelah proses manufaktur.

Selain faktor diatas, pemilihan bantalan haruslah sesuai dengan aplikasinya untuk memperoleh usia pakai yang wajar.

Cacat tunggal pada bantalan gelinding dapat diketahui dengan mengamati tingkat getaran frekuensi yang menandakan cacat-cacat tersebut, Gambar 3. 21

memperlihatkan komponen getaran akibat cacat pada lintasan luar beserta harmoniknya. Pada Gambar 3. 22. komponen getaran akibat cacat pada bantalan gelinding yang dimodulasi oleh kecepatan putarnya, terlihat adanya *sidebands* kecepatan putar pada frekuensi tersebut. Besarnya frekuensi-frekuensi ini dapat dihitung dan nilainya bergantung pada geometri dan dimensi bantalan gelinding. Gambar 3. 20 memperlihatkan nomenklatur bantalan gelinding ini. Asumsi yang digunakan dalam perhitungan yaitu, cacat tunggal, kontak jenis rolling, dan cincin dalam berputar bersama poros sementara cincin luar diam. Rumus untuk menghitung besarnya frekuensi itu adalah [7]:

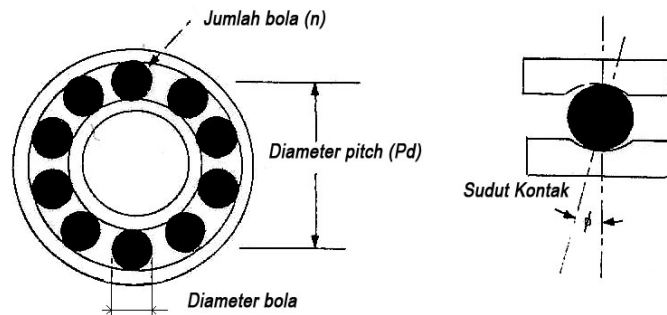
$$\text{Fundamental train frekuensi, } FTF = \frac{rps}{2} \left[1 - \frac{Bd}{Pd} \cos(\phi) \right]$$

$$\text{Cacat pada bola, } BS = \frac{Pd}{2Bd} rps \left[1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \right)^2 \cos^2 \phi \right]$$

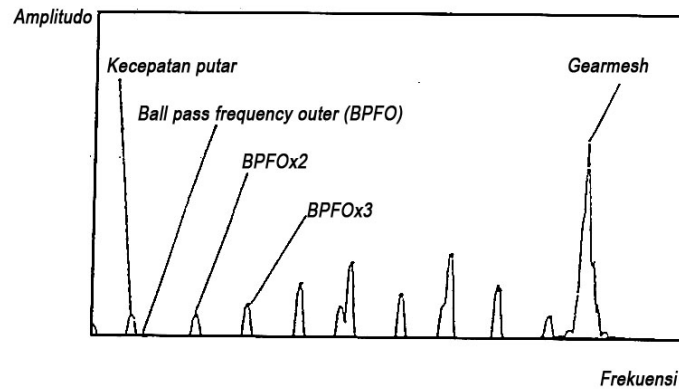
$$\text{Cacat pada lintasan luar, } OR = N(FTF)$$

$$\text{Cacat pada lintasan luar, } IR = N(rps - FTF)$$

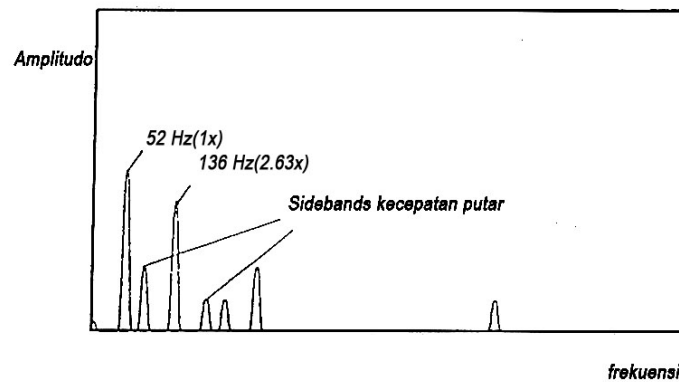
Dengan, rps : rotasi per detik
 Bd : diameter bola
 Pd : diameter pitch
 N : jumlah bola
 Φ : sudut kontak



Gambar 3. 20 Nomenklatur bantalan gelinding.



Gambar 3. 21 Spektrum getaran mesin dengan cacat di lintasan luar bantalan gelindingnya [6].



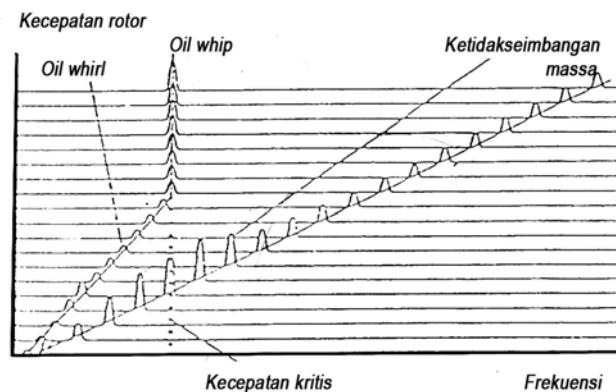
Gambar 3. 22 Komponen getaran akibat cacat bantalan, dimodulasi oleh kecepatan putar [6].

Sinyal getaran yang dibangkitkan oleh kerusakan tahap awal memiliki intensitas yang sangat kecil jika dibandingkan sinyal getaran lainnya. Untuk dapat mendeteksi sinyal ini, pemantauan dilakukan dalam domain frekuensi dengan amplitudo dalam skala dB. Penggunaan skala dB memungkinkan untuk mendeteksi sinyal dengan intensitas yang jauh lebih kecil dari sinyal lain. Dengan memonitor sinyal getaran secara berkala, maka gejala kerusakan dapat dideteksi sebelum kerusakan menjadi kronis dan sulit untuk menentukan penyebab rusaknya.

3.5.5 Oil Whirl

Oil whirl merupakan suatu fenomena getaran yang terjadi pada bantalan luncur, menghasilkan getaran dengan frekuensi berkisar setengah kali kecepatan putar [7]. Pada bantalan luncur, poros akan ditumpu oleh lapisan tipis minyak pelumas. Fluida diantara poros dan bantalan akan bergerak dengan kecepatan setengah kali kecepatan putar. Fluida pada celah yang lebih sempit memiliki tekanan yang lebih besar daripada fluida pada celah lebih besar. Perbedaan ini akan menimbulkan gaya angkat sehingga poros mengambang, juga menimbulkan gaya tangensial yang dapat menyebabkan terjadinya *whirl* searah dengan putaran poros.

Oil whirl dengan frekuensi yang sama dengan kecepatan kritis poros akan menyebabkan getaran dengan simpangan yang besar sehingga lapisan minyak pelumas tidak lagi mampu mendukung poros. Kondisi ini dinamakan *oil whip* dan terjadi bila *oil whirl* dengan kecepatan putar poros mencapai dua kali kecepatan kritisnya. Gambaran perkembangan *oil whirl* menjadi *oil whip* dapat dilihat pada gambar Gambar 3. 23.



Gambar 3. 23 Peta spektral perkembangan *oil whirl* menjadi *oil whip* [6].

Pada kondisi yang parah, *oil whirl* dapat mengakibatkan terjadinya gesekan antara poros dan bantalan, diikuti dengan pemanasan lokal. Pembuktian telah terjadinya kontak antar logam ini dapat diperkuat dengan melakukan pemeriksaan partikel logam pada minyak pelumas. Langkah yang diambil untuk mengatasi *oil whirl* dengan menaikkan beban pada bearing, seperti mempersempit celah antara poros dan bantalan.

Penghambatan pola aliran fluida yang simetri juga dapat dilakukan, seperti penambahan *groove* dalam arah aksial, *pressure dam* dan *tilting pad* [7].

3.5.6 Resonansi

Resonansi terjadi apabila sebuah struktur dieksitasikan oleh getaran pada frekuensi naturalnya sehingga terjadi getaran pada struktur tersebut dengan amplitudo yang besar. Nilai frekuensi natural ini bergantung pada massa dan kekakuan struktur.

Untuk sistem satu derajat kebebasan berupa massa yang didukung oleh pegas yang tak bermassa, maka frekuensi natural, $\omega_{nn} = \sqrt{k / m}$. Untuk objek lain rumusan frekuensi natural ini akan lebih kompleks, namun pada dasarnya berbanding lurus dengan kekakuan dan berbanding terbalik dengan massa. Perubahan pada kekakuan struktur akan meningkatkan nilai frekuensi natural, sebaliknya penambahan massa struktur akan membuat frekuensi natural ini turun. Sebagai contoh, penurunan kekakuan pada bantalan berakibat penurunan nilai frekuensi naturalnya. Setiap objek memiliki lebih dari satu modus getar, demikian pula halnya dengan frekuensi natural ini. Redaman memiliki kemampuan untuk mengurangi amplitudo maksimum yang terjadi akibat resonansi.

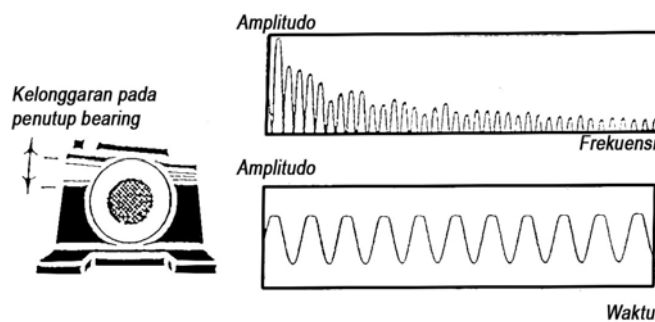
Resonansi sensitif terhadap kecepatan. Oleh sebab itu, identifikasi resonansi dapat dilakukan mengubah kecepatan putar. Resonansi yang dieksitasi oleh getaran pada kecepatan putar, akan menurun tingkat getarannya seiring dengan perubahan ini. Resonansi yang disebabkan oleh getaran yang berasal dari luar mesin tersebut, akan memiliki tingkat getaran yang tetap. Fase komponen getaran akibat resonansi terhadap sinyal *keyphasor* tidak akan konstan, berbeda dari getaran terkait dengan putaran mesin yang memiliki besar fase yang konstan.

Indikasi lain terjadinya resonansi adalah terjadinya getaran dengan amplitudo yang relatif besar pada satu arah (lebih dari lima kali) dibandingkan getaran pada arah yang lain di frekuensi yang sama. Biasanya mesin bergetar dengan amplitudo yang mirip pada suatu frekuensi. Terjadinya perbedaan amplitudo yang relatif besar pada satu arah ini menandakan frekuensi natural struktur pada arah tersebut.

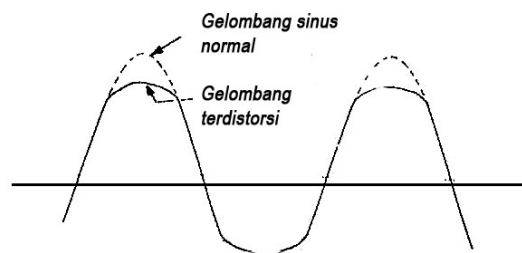
3.5.7 Kekendoran (*Mechanical Looseness*)

Kekendoran menampilkan getaran pada domain frekuensi berupa sejumlah besar harmonik dari kecepatan putar dan bisa juga disertai harmonik pada frekuensi lebih kecil dari kecepatan putar.

Munculnya harmonik disebabkan karena terpotongnya puncak gelombang ketika pergerakan komponen yang kendor terhalang oleh batas pergerakannya. Akibatnya respon yang terjadi berupa bentuk sinusoidal yang terpotong, seperti pada Gambar 3. 24 dan Gambar 3. 25.



Gambar 3. 24 Getaran akibat kekendoran, menghasilkan sinyal sinusoidal dengan puncak yang terpotong [6].



Gambar 3. 25 Gelombang sinus yang terdistorsi pada puncak-puncaknya.

Untuk mendeteksi kekendoran dapat dilakukan dengan mengukur getaran pada beberapa titik. Komponen getaran yang dihasilkan kekendoran akan memiliki nilai amplitudo yang maksimum disekitar komponen yang kendor.

3.5.8 Getaran Pada Mesin Resiprok

Mesin resiprok memiliki getaran yang lebih besar relatif terhadap mesin rotari. Mesin ini memiliki getaran yang tinggi pada 1x RPM dan harmoniknya. Sumber utama dari getaran berasal dari tekanan gas hasil pembakaran pada ruang bakar dan getaran oleh ketidakseimbangan putaran poros oleh pergerakan piston dan batang penghubung. Getaran yang berlebihan dapat terjadi apabila terjadi masalah dalam operasi seperti *misfiring*, *piston slap*, kebocoran kompresi, dan kerusakan pada katup. Analisis dalam domain waktu dapat digunakan untuk mengenali terjadinya benturan antara komponen, yang akan terlihat sebagai pulsa kejut (*shock pulse*).