

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Metode deteksi cacat pada bantalan sudah banyak diteliti oleh peneliti sebelumnya. Penelitian tersebut secara umum berbasiskan pada getaran. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah metode spektrum. Namun metode spektrum mempunyai kekurangan dimana jika *noise* tinggi maka metode spektrum seringkali tidak dapat menunjukkan amplitudo cacat pada bantalan. Berkembang metode lain yang digunakan sebelum melakukan analisis spektrum yaitu dengan menggunakan teknik untuk mereduksi *noise*. Salah satu metode untuk mereduksi *noise* tersebut adalah *time synchronous averaging* (TSA).

Beberapa penelitian yang penting untuk di cermati adalah penelitian yang telah dilakukan oleh Setiyadi & Raharjo (2016). Mereka meneliti tentang cacat suatu bantalan pada bagian sangkar (*cage*) dengan menggunakan metode domain waktu dan domain frekuensi (spektrum). Peneliti tersebut melakukan pengambilan data menggunakan bantalan bola normal dan bantalan bola cacat pada bagian sangkar dengan tingkat variasi cacat ringan, sedang, dan berat. Amplitudo yang dihasilkan dari bantalan bola normal dan bantalan bola cacat dengan variasi tingkat cacat ringan, sedang, dan berat yang ditunjukkan oleh spektrum masing-masing sebesar 0,0007 m/s^2 , 0,005 m/s^2 , 0,007 m/s^2 , 0,0112 m/s^2 . Sehingga mereka dapat menyimpulkan bahwa semakin parah tingkat kerusakan pada bantalan bola maka nilai amplitudo yang dihasilkan akan semakin besar.

Penelitian lain yang penting untuk di cermati yaitu penelitian yang telah dilakukan oleh Aji (2007). Dia meneliti tentang deteksi cacat bantalan dengan metode spektrum pada bantalan normal dan bantalan yang cacat. Amplitudo yang dihasilkan oleh sinyal getaran pada bantalan dapat dijadikan sebagai indikasi pertama ketika melakukan pemantauan kondisi dari bantalan tersebut. Bantalan dalam kondisi baru tidak mempunyai nilai amplitudo yang tinggi karena pada saat permukaan dari elemen

bantalan saling berkontak maka kontak tersebut masih normal sehingga tidak terjadi adanya gesekan yang berlebihan. Hasil yang diperoleh pada spektrum menghasilkan nilai amplitudo dari frekuensi cacat bantalan sebesar 1,294 BPFI, 1,662 BPFO, dan 2,006 BSF. Cacat yang paling parah dari penelitian tersebut terjadi pada bantalan bagian bola.

Analisis menggunakan spektrum seringkali kurang efektif untuk mendeteksi kerusakan pada suatu bearing. Hal tersebut disebabkan oleh sinyal yang tercampur dengan *noise* yang dapat mengganggu ketika proses pengambilan data. Salah satu teknik untuk mereduksi *noise* yaitu menggunakan metode TSA. Penelitian yang telah dilakukan menggunakan metode TSA ini pernah diteliti oleh Zhang & Isom (2011). Metode tersebut diterapkan mereka pada penelitian *gearbox*. Ada 3 poros pada *gearbox* tersebut yaitu poros input, poros diam, dan poros output. Poros input beroperasi pada kecepatan tinggi sebesar 3000 rpm. Data dikumpulkan dari *gearbox* termasuk dua roda gigi pemacu dan pasangan roda gigi heliks. Poros dan dua gigi pacu pada *gearbox* dan harmoniknya terlihat jelas menggunakan metode TSA. Mereka menganggap metode TSA merupakan metode yang sederhana untuk memisahkan sinyal getaran yang ada pada *gearbox*. Sehingga mereka menggunakan metode tersebut untuk penelitian mereka dan menghasilkan penelitian yang memuaskan.

Peneliti lain yang telah menggunakan metode TSA diteliti oleh Yanhui, dkk (2014) yang meneliti tentang *gerbox* turbin angin. Peneliti menyatakan bahwa model sinyal getaran yang dihasilkan oleh *gearbox* mempunyai modulasi amplitudo dan modulasi frekuensi yang rumit. Metode yang dilakukan peneliti untuk mendeteksi kondisi dari *gearbox* turbin angin ini menggunakan metode TSA. Saat pengambilan data mereka mereka melakukan peningkatan sinyal dan mereduksi *noise* menggunakan metode ini. Metode TSA sebagai teknik *pre-processing* diyakin sangat efektif untuk meningkatkan rasio sinyal terhadap *noise* dalam domain frekuensi (spektrum).

Penelitian lain yang juga membuktikan bahwa metode TSA efektif untuk dilakukan adalah seperti penelitian yang telah dilakukan oleh Christian, dkk (2007) yang menyatakan bahwa TSA merupakan teknik ekstraksi yang telah banyak

digunakan untuk memantau kondisi *gearbox*. Pada penelitiannya TSA digunakan untuk memantau kondisi bantalan. Peneliti melakukan validasi TSA melalui pendekatan komputasi dengan sinyal yang didapat. Sinyal tersebut berasal dari tes rig motor listrik 2 hp yang dimuat oleh dinamometer. Motor listrik tersebut memiliki dua buah bantalan cacat yang dipasang di lokasi yang berbeda yaitu *drive end* (DE) dan *fan end* (FE). Peneliti merusak bantalan tersebut menggunakan *electro discharge machining* (EDM) pada bagian *inner race* dan *outer race*. Sinyal getaran diambil 10 detik dan dikumpulkan pada kecepatan poros masing-masing yaitu pada 1797, 1772, 1750, dan 1730 rpm dengan menggunakan akselerometer yang terpasang pada rumah motor listrik tepat di angka jam 12. *TSA analyzer* memperlihatkan deteksi dengan menggunakan metode TSA dan *envelope* sangat tepat untuk mengolah sinyal mentah dengan cara memutar sinyal mentah tersebut secara berulang-ulang. Sehingga peneliti dapat dengan jelas melihat pentingnya metode TSA untuk digunakan sebagai teknik mereduksi *noise* yang tepat dan efektif.

Dari penelitian yang telah dibahas di atas metode untuk mendeteksi cacat pada bantalan adalah menggunakan metode spektrum dan TSA. Penelitian yang menggunakan metode spektrum seringkali kurang efektif untuk mengetahui kondisi suatu bantalan karena amplitudo yang dihasilkan pada frekuensi tinggi dari bantalan tidak dapat terlihat dengan jelas akibat sinyal yang dihasilkan tertutup oleh *noise*. Sehingga para peneliti yang telah dibahas di atas menggunakan metode TSA yang diyakini efektif untuk mengetahui kondisi suatu bantalan. Metode TSA memiliki keunggulan untuk mereduksi *noise* sehingga para peneliti di atas menggunakan metode ini sebagai teknik *pre-processing* untuk meningkatkan rasio sinyal terhadap *noise* dalam spektrum. Oleh karena itu, para peneliti di atas banyak menggunakan metode TSA untuk mengetahui kondisi dari suatu bantalan.

2.2 DASAR TEORI

2.2.1 *Fan* (Kipas)

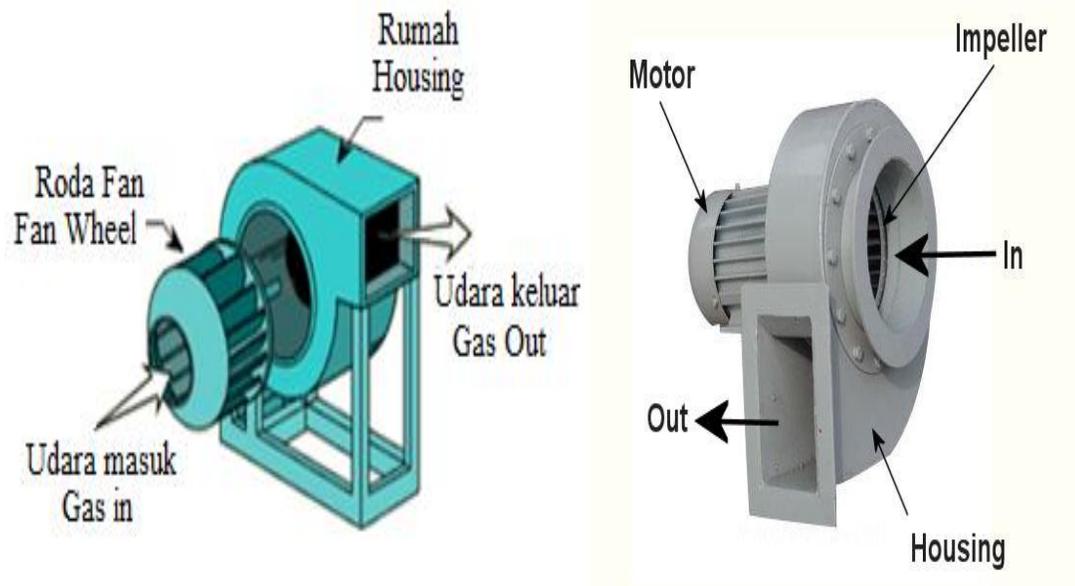
Fan (kipas) adalah sebuah alat yang digunakan untuk menghasilkan aliran fluida yang berupa udara. *Fan* banyak digunakan dimana saja contohnya seperti dirumah, tempat umum, dan industri. *Fan* di industri banyak digunakan untuk pendingin ruangan dan sebagai pendingin mesin yang sedang beroperasi. *Fan* biasanya terdiri dari beberapa komponen yaitu, *blade*, *casing*, motor listrik, bantalan, dan poros. Apabila *fan* digunakan terus menerus tanpa henti akan menyebabkan komponennya panas dan aus. Oleh karena itu *fan* harus dirawat dengan baik agar komponennya tidak terjadi cacat atau rusak yang parah.

Secara umum *fan* dibagi menjadi dua jenis utama yaitu sentrifugal dan aksial. Kedua jenis *fan* tersebut dikelompokkan berdasarkan jalur alirannya. *Fan* aksial bertindak seperti baling-baling yaitu menghasilkan aliran udara di sepanjang arah sumbu *fan* tersebut. *Fan* sentrifugal menghasilkan aliran udara dengan cara mempercepat aliran udara secara radial dengan mengubah energi kinetik menjadi tekanan. *Fan* aksial dan sentrifugal memiliki kemampuan tumpang tindih dalam hal tekanan, aliran udara, dan efisiensi. Namun kedua *fan* tersebut biasanya tidak dapat dipertukarkan (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013).

A. *Fan* Sentrifugal

Fan sentrifugal adalah jenis *fan* yang paling umum digunakan di industri seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. *Fan* sentrifugal merupakan jenis *fan* yang meningkatkan kecepatan aliran fluida menggunakan putaran impeller. Setelah kecepatan aliran meningkat hingga mencapai bagian ujung *blade*, selanjutnya akan diubah menjadi tekanan. *Fan* sentrifugal dapat menghasilkan tekanan tinggi dengan efisiensi tinggi, dan *fan* tersebut dapat dirancang untuk mengakomodasi pada kondisi operasi yang keras. *Fan* sentrifugal memiliki beberapa jenis bentuk pisau, termasuk

forward-curved, radial-blade, radial-tip, backward-inclined, backward-curved, dan airfoil.

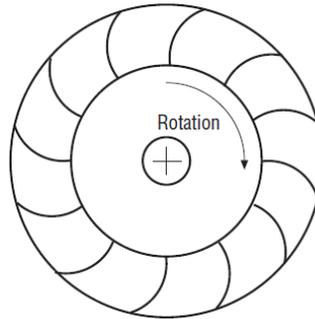


Gambar 2.1 *Fan* Sentrifugal (Ir. Muh. Arif Latar, 2008)

Beberapa jenis *fan* sentrifugal mampu melayani berbagai kondisi operasi yang dapat menjadi keuntungan yang signifikan (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013). Jenis *blade* pada *fan* sentrifugal adalah sebagai berikut :

a. Forward-Curved Blades

Fan sentrifugal dengan bentuk *blades* yang melengkung kearah rotasi (*forward-curved blade*) seperti ini biasanya digunakan dalam aplikasi yang memerlukan volume udara rendah dan sedang pada tekanan yang rendah seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Hal ini ditandai dengan nilai efisiensi yang relatif rendah antara 55%-65%. Jenis *fan* ini dapat beroperasi pada kecepatan yang relatif rendah yang menghasilkan tingkat kebisingan yang rendah.



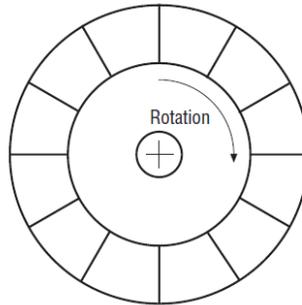
Gambar 2.2 *Forward-Curved Blades* (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013)

Forward-curved blade ini biasanya dipilih untuk *fan* sentrifugal karena memiliki ukuran yang relatif kecil daripada jenis *fan* lainnya. *Forward-curved fan* biasanya terbatas untuk aplikasi layanan kebersihan. *Fan* ini biasanya tidak dirancang untuk tekanan tinggi atau layanan yang keras. *Forward-curved fan* memiliki kurva daya yang terus meningkat dengan aliran udara menuju aliran bebas, akibatnya pemilihan *driver* yang cermat diperlukan untuk menghindari *overloading* motor pada *fan* (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013).

b. *Radial Blade*

Fan sentrifugal dengan bentuk *blade radial* biasanya digunakan dalam aplikasi dengan laju aliran udara rendah hingga sedang pada tekanan tinggi. Bentuk bilah datar membatasi pembentukan material, akibatnya *fan* ini mampu menangani aliran udara partikulat tinggi, termasuk debu, serpihan kayu, dan potongan logam. *Fan* jenis ini memiliki karakter yang kasar. Desain yang sederhana dari *fan* ini memungkinkan banyak toko pengerjaan logam membangun unit khusus untuk aplikasi khusus. Dalam banyak kasus, *blade* pada *fan* ini dilapisi dengan senyawa pelindung untuk meningkatkan erosi dan ketahanan terhadap korosi. Jarak yang bebas dan besar antar *blade* memungkinkan *fan* ini mampu beroperasi pada aliran udara yang rendah tanpa terjadi permasalahan getaran yang berlebih (DOE, AMCA International, Lawrence

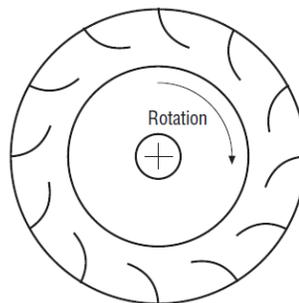
Berkeley National Laboratory, 2013). Adapun bentuk dari *radial blade* ditunjukkan pada gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2.3 *Radial Blade* (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013)

c. *Radial Tip*

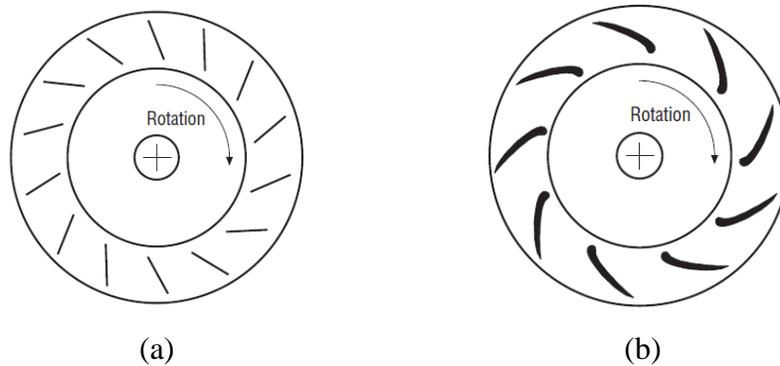
Bentuk *blade* jenis ini mengisi celah antara *fan* udara bersih dan *fan radial-blade* yang lebih kasar. *Fan* dengan *blade radial tip* dicirikan dengan sudut serang rendah antara baling-baling dan udara masuk yang mendorong turbulensi rendah. *Fan* jenis ini memiliki banyak karakteristik kesamaan dengan *fan* jenis *radial-blade* dan sangat cocok untuk digunakan dengan aliran udara yang memiliki partikel kecil pada konsentrasi sedang dan aliran udara dengan kandungan kelembaban yang tinggi. *Fan* jenis *radial-tip* ini dapat memiliki efisiensi hingga 75% persen (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013). Adapun bentuk dari *radial tip* ditunjukkan pada gambar 2.4 berikut ini.



Gambar 2.4 *Radial Tip* (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013)

d. Backward-Inclined

Fan dengan bentuk *blade* ini dicirikan dengan bilah yang miring jauh dari arah putaran. Dalam *fan* ini ada dua bentuk *blade* yang berbeda yaitu datar, dan *airfoil*. Jenis *blade* datar ditunjukkan pada gambar 2.5 (a) sedangkan jenis *blade airfoil* ditunjukkan pada gambar 2.5 (b). *Blade* jenis *airfoil* memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada *blade* jenis datar yaitu mencapai 85 persen. Karena bilah *airfoil* bergantung pada daya angkat yang diciptakan oleh masing-masing *blade*. Jenis *fan* ini sangat rentan terhadap operasi yang tidak stabil. *Blade* dari *airfoil* tipis akan lebih efisien daripada jenis *blade* lainnya karena massa rotasinya yang lebih rendah. Namun, karakteristik yang tipis ini membuat *fan* jenis ini sangat rentan terhadap masalah erosi. Hilangnya ketebalan pada dinding *blade* dapat menyebabkan pembentukan rongga pada *blade* tersebut yang dapat mengganggu kinerja dari *fan* (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013).



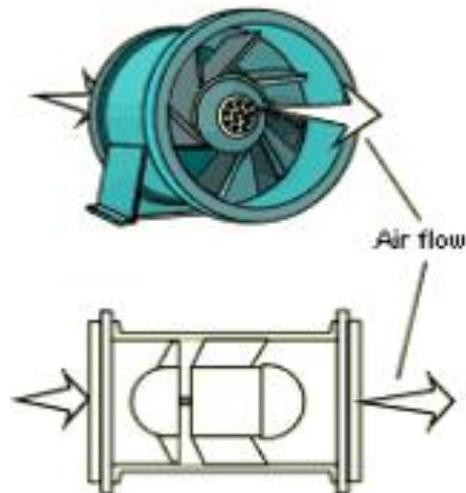
Gambar 2.5 (a) *Backward-inclined*, (b) *Backward-inclined airfoil*

(DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013)

B. *Fan Aksial*

Fan aksial merupakan jenis *fan* yang menggerakkan aliran udaranya sepanjang arah sumbu *fan* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6. Cara kerja jenis *fan* aksial ini seperti impeler pada pesawat terbang. *Blade* pada *fan* menghasilkan daya angkat

aerodinamis yang dapat menekan aliran udara. *Fan* jenis ini sering digunakan di industri karena bentuknya yang kompak, harganya murah, dan ringan.



Gambar 2.6 *Fan* Aksial (Ir. Muh. Arif Latar, 2008)

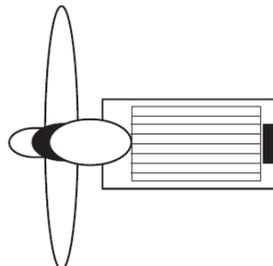
Fan aksial sering digunakan dalam aplikasi pembuangan dengan ukuran partikel udara yang kecil contohnya seperti debu, asap, dan uap. *Fan* aksial juga berguna dalam aplikasi ventilasi yang membutuhkan kemampuan untuk menghasilkan aliran udara balik. Walaupun *fan* ini biasanya dirancang untuk menghasilkan aliran dalam satu arah, *fan* ini juga dapat beroperasi dalam arah berlawanan. Karakteristik tersebut berguna ketika ruang mungkin memerlukan udara segar yang harus disediakan (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013).

Fan aksial memiliki daerah kegagalan parah yang membuat *fan* jenis ini sangat tidak cocok untuk sistem dengan berbagai kondisi operasi. Pada daerah tersebut aliran udara tidak cukup untuk mengisi baling-baling yang menyebabkan *fan* beroperasi tidak stabil. Konsekuensi yang ditimbulkan akibat tidak stabilnya dari operasi *fan* yaitu keausan, pola kebisingan yang mengganggu, dan turunnya efisiensi (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013).

Fan aksial memiliki 3 jenis fan utama menurut arah alirannya yaitu *fan propeller*, *fan tubeaxial*, dan *fan vaneaxial*. Penjelasan dari ketiga *fan* tersebut adalah sebagai berikut :

a. *Propeller Fan* (kipas baling-baling)

Fan jenis *propeller* mampu menghasilkan laju aliran udara yang tinggi pada tekanan yang rendah. Karena *fan* ini tidak menghasilkan banyak tekanan. *Fan* ini biasanya tidak dikombinasikan dengan saluran udara yang luas. *Fan* jenis ini cenderung memiliki efisiensi yang relatif rendah, tetapi harganya murah dan memiliki konstruksi sederhana. Karena memiliki efisiensi yang rendah *fan* jenis ini cenderung relatif berisik. Kebutuhan daya kipas ini akan berkurang apabila ada peningkatan aliran udara. *Fan* jenis ini sering digunakan dalam aplikasi ventilasi pada atap (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013). *Fan* jenis baling-baling ini ditunjukkan pada gambar 2.7 berikut ini.

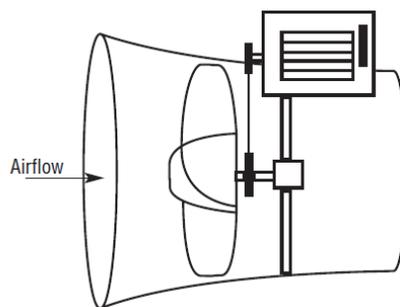


Gambar 2.7 *Propeller Fan* (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013)

b. *Tubeaxial Fan*

Fan tubeaxial merupakan jenis *fan* yang lebih kompleks dari *fan* baling-baling. *Fan* jenis ini pada dasarnya adalah *fan* jenis baling-baling yang ditempatkan didalam silinder. *Fan tubeaxial* memiliki nilai efisiensi dan tingkat tekanan aliran udara yang lebih baik daripada *fan* baling-baling. *Fan tubeaxial* digunakan dalam aplikasi tekanan sedang, aliran berkecepatan tinggi dan sangat cocok untuk pemasangan instalasi HVAC (*Heating, Ventilating, Air Conditioning*). Bentuk profil aliran udara pada bagian hilir *fan* tidak merata akibat komponen rotasi yang besar (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013).

Fan tubeaxial sering digunakan dalam aplikasi pembuangan karena *fan* jenis ini dapat membuat tekanan yang cukup untuk mengurangi rugi-rugi saluran yang relatif menghemat uang. Sama seperti *fan* baling-baling, *fan tubeaxial* juga memiliki daerah ketidakstabilan yang harus dihindari. *Fan tubeaxial* dapat terhubung langsung ke sebuah motor atau didorong melalui konfigurasi *belt*. Karena kecepatan operasi motor yang tinggi, *fan tubeaxial* biasanya menggunakan *belt drive* untuk mencapai kecepatan *fan* dibawah 1100 putaran per menit (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013). *Fan tubeaxial* ditunjukkan pada gambar 2.8 berikut ini.

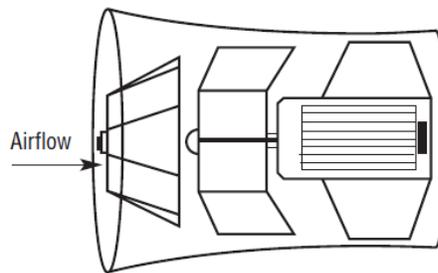


Gambar 2.8 *Fan Tubeaxial* (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013)

c. *Vaneaxial Fan*

Penyempurnaan lebih lanjut dari *fan* aksial adalah *fan vaneaxial*. *Fan* ini pada dasarnya adalah *fan tubeaxial* dengan outlet baling-baling yang meningkatkan pola aliran udara untuk mengubah energi kinetik aliran udara menjadi tekanan. Baling-baling ini menciptakan profil aliran udara yang relatif seragam. *Fan vaneaxial* biasanya digunakan dalam aplikasi tekanan sedang hingga tinggi contohnya seperti rancangan layanan induksi untuk pipa asap pada boiler. Seperti *fan tubeaxial*, *fan vaneaxial* cenderung memiliki massa rotasi rendah yang memungkinkan *fan* jenis ini untuk mencapai kecepatan operasi yang relatif cepat. Karakteristik ini berguna dalam aplikasi ventilasi darurat dimana udara cepat dipindahkan (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013).

Seperti *fan* aksial lainnya, *fan vaneaxial* mampu menghasilkan aliran dalam arah terbalik yang juga dapat digunakan dalam aplikasi ventilasi. Namun aplikasi tersebut masih memerlukan pasokan udara segar dan melakukan penghilangan udara yang terkontaminasi. *Fan vaneaxial* ini sangat efisien ketika dilengkapi dengan *blade airfoil* dan dirancang dengan jarak kecil. Efisien yang dapat dicapai oleh *fan vaneaxial* yaitu hingga 85 persen. *Fan* jenis ini sering terhubung langsung ke poros motor tanpa ada perantaranya. *Fan vaneaxial* ditunjukkan pada gambar 2.9 berikut ini.



Gambar 2.9 *Fan Vaneaxial* (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013)

C. Masalah Umum Sistem *Fan*

Seperti kebanyakan mesin rotary lainnya, pemakaian *fan* juga memerlukan perawatan dan perbaikan secara berkala. Permukaan dinamis pada bantalan dan penggerak *belt* akan menurun seiring berjalannya waktu. Permukaan *blade* pada *fan* juga bisa terkikis dan motor akhirnya memerlukan penggantian. Meskipun beberapa tingkat keausan tidak bisa dihindari, mengoperasikan sistem pada tingkat yang efisien dapat mengurangi risiko kegagalan peralatan secara mendadak dan dapat menurunkan biaya serta dapat menurunkan frekuensi pemeliharaan (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013).

Masalah sistem pada *fan* secara umum yaitu masalah yang terkait dengan pemasangan *fan* atau motor. Masalah yang terjadi pada pemasangan *fan* atau motor akibat dari hasil pemilihan komponen yang kurang tepat, instalasi yang buruk, dan perawatan yang buruk. Bagian *fan* yang biasanya mengalami kerusakan yaitu *belt*

drive, bantalan, motor. Pada bagian *belt drive* masalah yang biasa timbul yaitu keausan pada *belt*, kebisingan, dan bahkan pecah. Hal tersebut disebabkan oleh *belt* yang menegang dan terjadi selip. Pada bagian bantalan masalah yang biasanya timbul yaitu keausan, kebisingan, retak. Hal ini disebabkan oleh adanya kotoran atau debu, beban yang berlebih, dan pengoperasian mesin tanpa henti. Untuk mencegah hal tersebut terjadi maka harus dilakukan perawatan secara berkala. Pada bagian motor masalah yang biasanya timbul yaitu suhu motor tinggi akibat pemakaian yang berlebih. Untuk mencegah hal tersebut maka harus dilakukan perawatan yang berkala, dan pemakain dari motor harus dijeda, apabila dipaksakan akan mudah panas dan rusak (DOE, AMCA International, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013).

2.2.2 Bantalan (*bearing*)

Bantalan merupakan salah satu komponen yang penting untuk mendukung beroperasinya sebuah mesin. Bantalan berfungsi untuk menahan beban dari komponen mesin lainnya baik berupa beban radial maupun beban aksial atau mendukung suatu poros agar tetap padaudukannya. Fungsi lain bantalan yaitu untuk mengurangi gesekan antara poros yang berputar dengan tumpuannya yang dapat mempengaruhi efisiensi kinerja dari mesin tersebut saat sedang beroperasi. Jika sebuah bantalan mengalami cacat atau kerusakan maka kerusakan juga akan dialami oleh komponen mesin lainnya, sehingga dapat mempengaruhi prestasi mesin ketika beroperasi.

Analisis yang baik terhadap pantauan kondisi cacat atau kerusakan pada komponen bantalan sangat berguna untuk terus berlangsungnya proses produksi di suatu industri. Penerapan jadwal perawatan yang baik terkait diagnosis cacat / kerusakan pada bantalan merupakan kegiatan yang menguntungkan bagi perusahaan industri. Karena dampak dari cacat atau kerusakan pada komponen mesin akan mengganggu jalannya proses produksi. Contohnya seperti pada *fan* aksial, fungsi bantalan sangat peting dalam kelancaran putaran poros, sehingga kondisi bantalan tersebut harus selalu dipantau agar tetap dalam kondisi baik. Apabila bantalan tersebut

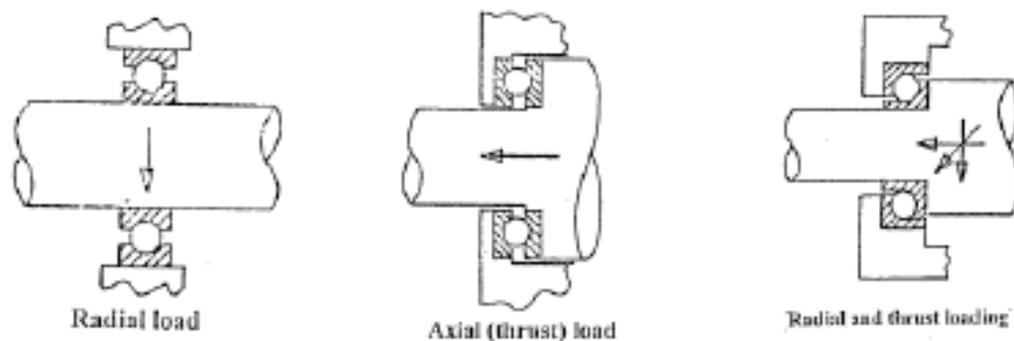
tetap dijaga dalam kondisi yang baik maka akan berdampak pada kelancaran beroperasinya *fan* aksial di industri.

A. Klasifikasi Bantalan

Penggunaan bantalan secara luas menimbulkan bantalan memiliki beragam jenis sesuai dengan kegunaannya. Secara umum bantalan dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Klasifikasi bantalan berdasarkan arah pembebanan terhadap poros
 1. Bantalan radial (*journal bearing*). Pada bantalan jenis ini arah beban yang ditumpu bantalan yaitu tegak lurus sumbu poros.
 2. Bantalan aksial (*thrust bearing*). Pada bantalan jenis ini arah beban bantalan sejajar dengan sumbu poros.
 3. Bantalan gelinding khusus (*bearing kombinasi*) . Bantalan jenis ini mampu menumpu beban yang arahnya sejajar dan tegak lurus sumbu poros.

Ketiga jenis bantalan berdasarkan arah pembebanannya tersebut dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Bantalan menurut arah pembebanannya (Negara, 2018)

b. Klasifikasi bantalan berdasarkan gerakan terhadap poros

1. Bantalan luncur. Pada bantalan jenis ini terjadi gesekan luncur antara poros dan bantalan karena permukaan poros ditumpu oleh permukaan bantalan dengan perantaranya yaitu lapisan pelumas seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11 berikut ini :



Gambar 2.11 Bantalan luncur (Negara, 2018)

2. Bantalan gelinding. Pada bantalan jenis ini terjadi gesekan gelinding antara bagian yang berputar dengan bagian yang diam melalui elemen gelinding seperti bola (peluru), rol atau rol bulat. Contoh bantalan gelinding dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Bantalan Gelinding (Erinofiardi, 2011)

Bantalan gelinding berdasarkan bentuk elemen gelindingnya dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu bantalan bola dan bantalan rol. Kelebihan dari kedua bantalan tersebut adalah gesekan yang ditimbulkan oleh kedua bantalan ini relatif kecil jika dibandingkan dengan bantalan yang lain. Namun, bantalan yang digunakan pada penelitian ini hanya terfokus pada bantalan bola jenis *self aligning double row*. *Double row* berarti bantalan ini memiliki dua baris bola, sedangkan *self aligning* yang berarti bagian dalam bantalan ini mampu bergerak untuk menyesuaikan posisinya. Bantalan bola jenis ini digunakan pada *fan* aksial sebagai pendukung gerakan putaran poros.

B. Bantalan Bola Jenis Self Aligning Double Row

Bantalan bola merupakan bantalan yang dapat menerima beban aksial yang kecil namun dapat menerima beban radial yang besar. Berbeda dengan bantalan rol yang hanya mampu menerima beban radial saja. Bantalan bola jenis *self aligning double row* memiliki dua baris pada cincin bagian dalam dan masing-masing baris memiliki alur tersendiri. Pada cincin bagian luarnya terdapat alur bola. Cincin bagian dalam dari bantalan ini mampu bergerak sendiri untuk menyesuaikan posisinya. Kelebihan dari bantalan ini yaitu mampu mengatasi masalah poros yang kurang sebaris. Elemen bantalan tersebut terdiri dari bola, sangkar (*cage*), lintasan dalam (*inner race*), dan lintasan luar (*outer race*) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13 (gambar penelitian kami) berikut ini:



Gambar 2.13 Bantalan bola jenis *Self Aligning Double Row*

C. Jenis Cacat Pada Bantalan

Cacat atau kerusakan pada bantalan merupakan hal yang sering terjadi di dalam dunia permesinan. Untuk itu perlu dilakukan penanganan serius terkait hal tersebut. Terdapat beberapa faktor yang menyebabkan bantalan mengalami cacat atau rusak diantaranya adalah keausan, keretakan, pemasangan yang tidak tepat dan penggunaan minyak pelumas yang tidak sesuai. Cacat pada bantalan bola dapat dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu cacat terdistribusi dan cacat lokal. Jenis cacat terdistribusi pada bantalan bola diantaranya ketidaksamaan sumbu (*misalignment*) yang terjadi antara sumbu lintasan dalam dengan sumbu lintasan luarnya, ketidakbulatan lintasan dalam dan lintasan luarnya, dan ketidaksamaan dimensi dari bola. Sedangkan untuk jenis cacat lokal pada bantalan bola diantaranya terdapat goresan, terjadi aus pada elemen bantalannya, dan retak pada bagian lintasan luar, lintasan dalam, ataupun pada bolanya (Aji, 2007). Getaran yang ditimbulkan akibat cacat lokal pada bantalan bola akan menghasilkan nilai frekuensi dari masing-masing elemennya yang dapat dihitung menggunakan rumus berikut ini:

- a. Cacat yang terjadi pada bagian lintasan dalam menghasilkan frekuensi eksitasi *impuls* yang sering disebut dengan *Ball Pass Frequency Inner Race* (BPFI). Besarnya BPFI dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$BPFI = \frac{Nb}{2} fr \times \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right) \dots \dots \dots (2.1)$$

- b. Cacat yang terjadi pada bagian lintasan luar menghasilkan frekuensi eksitasi *impuls* yang sering disebut dengan *Ball Pass Frequency outer race* (BPFO). Besarnya BPFO dapat dihitung dan dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$BPFO = \frac{Nb}{2} fr \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right) \dots \dots \dots (2.2)$$

- c. Cacat yang terjadi pada bagian bola menghasilkan frekuensi eksitasi *impuls* yang sering disebut dengan *Ball Spin Frekuensi* (BSF). Besarnya BSF dapat dihitung dan dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$BSF = \frac{Nb}{2 Bd} fr \times \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right)^2\right) \dots \dots \dots (2.3)$$

- d. Cacat yang terjadi pada bagian sangkar (*cage*) menghasilkan frekuensi yang sering disebut dengan *Fundamental Train Frequency* (FTF). Besarnya FTF dapat dihitung dan dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$FTF = \frac{fr}{2} \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right) \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana :

Bd = Diameter bola (mm)

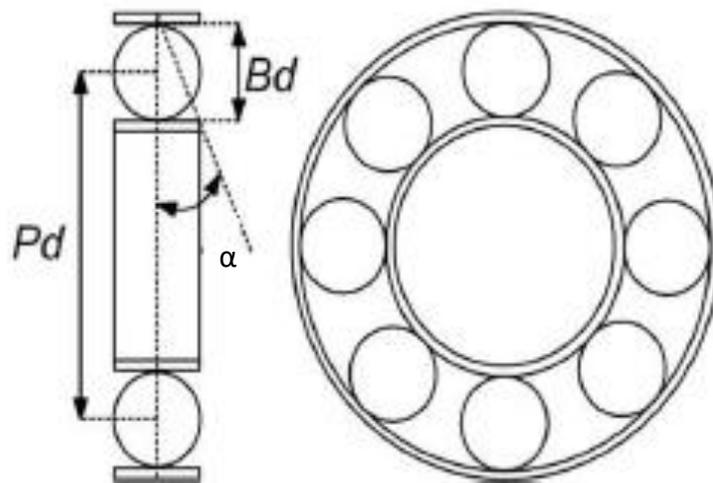
fr = Frekuensi putaran poros (Hz)

Nb = Jumlah bola

Pd = Diameter *Pitch* (mm)

α = Sudut kontak (derajat)

Dimensi diameter pitch dan diameter bola yang digunakan sebagai komponen perhitungan dalam mencari frekuensi cacat bantalan dijelaskan pada gambar 2.14 berikut ini.



Gambar 2.14 Dimensi Bantalan Bola (Negara, 2018)

Keempat cacat bantalan bola yang terjadi pada *inner race*, *outer race*, *ball*, dan sangkar dapat dilihat pada gambar 2.15 berikut ini.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 2.15 (a) Cacat lokal bantalan bola pada lintasan dalam, (b) Cacat lokal bantalan bola pada sangkar, (c) Cacat lokal bantalan bola pada lintasan luar, (d) Cacat lokal bantalan bola pada bagian bola

Sumber : (<http://jadanalysis.co.uk/bearing-failure-case-studies>)

2.2.3 Perawatan (*Maintenance*)

Perawatan dalam istilah disebutkan ada dua pekerjaan yang bisa dilakukan yaitu, adalah pekerjaan perawatan dan pekerjaan perbaikan. Pekerjaan perawatan yang dimaksud adalah aktifitas untuk mencegah terjadinya kerusakan pada suatu komponen mesin, sedangkan pekerjaan perbaikan adalah tindakan yang dilakukan untuk memperbaiki kerusakan pada suatu komponen mesin. Manajemen perawatan mesin pada sebuah industri penting untuk dilakukan agar mesin bisa tetap bekerja secara optimal. Manajemen perawatan mesin yang buruk pada sebuah perusahaan dapat mengakibatkan kerugian diberbagai aspek dalam perusahaan tersebut. Salah satu metode yang unggul yang dapat digunakan untuk memantau komponen sebuah mesin

seperti bantalan (*bearing*) yaitu *Condition-Based Maintenance* (CBM). Metode CBM yang digunakan oleh para peneliti umumnya adalah analisis berbasis getaran yang dapat mempermudah upaya dalam memantau komponen sebuah mesin khususnya bantalan. Metode CBM merupakan metode yang dikembangkan oleh para peneliti setelah metode perawatan yang telah ada sebelumnya. Metode perawatan yang telah ada sebelumnya meliputi *preventive maintenance*, *breakdown maintenance*, dan *predictive maintenance*. Berikut merupakan sedikit penjelasan dari metode tersebut.

1. *Breakdown Maintenance*

Perawatan jenis ini merupakan perawatan atau perbaikan yang dilakukan tanpa terencana atau secara mendadak. Dimana suatu mesin mengalami kegagalan atau kerusakan dan tidak berfungsi secara normal akibat adanya suatu kerusakan sehingga perlu adanya perbaikan atau penggantian komponen mesin yang rusak (Paresh & Scheffer, 2004).

2. *Preventive Maintenance*

Perawatan jenis ini merupakan perawatan atau pemeliharaan secara rutin yang terencana. Pemeliharaan ini menggunakan teori yang menyebutkan bahwa umur mesin terbatas dan kegagalan akan meningkat seiring bertambahnya umur mesin. Pemeliharaan ini dilakukan untuk mencegah kerusakan komponen mesin dan meminimalisir terjadinya *breakdown maintenance* akibat komponen mesin yang tidak terawat dengan baik dan secara berkala (Paresh & Scheffer, 2004).

3. *Predictive Maintenance*

Perawatan jenis ini sering disebut *condition based maintenance* (CBM) yaitu perawatan atau pemeliharaan yang disesuaikan dengan kondisi. Perawatan ini membutuhkan teknologi dan keahlian orang untuk menggabungkan semua data diagnostik dengan *performance* yang ada, data operasi, *maintenance histories*, dan desain untuk membuat suatu keputusan kapan harus dilakukan tindakan perawatan pada suatu mesin (Paresh & Scheffer, 2004).

2.2.4 Condition Based Maintenance (CBM)

Condition Based Maintenance (CBM) adalah sebuah program perawatan yang keputusan perawatannya direkomendasikan didasarkan pada informasi yang dikumpulkan dan kondisi pengukuran suatu mesin. CBM menggunakan proses *condition monitoring (CM)* untuk memantau kondisi kerja dari suatu komponen mesin dan mengumpulkan informasi data. Objek dari metode tersebut yaitu melakukan perawatan ketika terjadi sesuatu yang tidak normal pada suatu mesin sehingga bisa meminimalisir biaya perawatan. Metode ini memiliki tiga tahap yaitu:

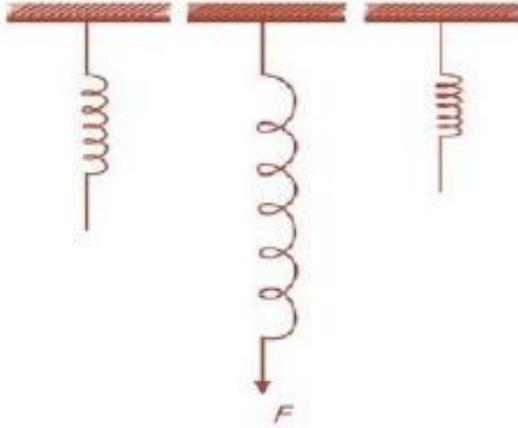
1. Tahap pengumpulan data informasi (*data acquisition*)
Tahap akuisisi data adalah sebuah proses pengumpulan data dan penyimpanan data atau informasi yang berguna sesuai kebutuhan CBM.
2. Tahap pemrosesan data (*data processing, conditioning*)
Tahap awal dari pemrosesan data yaitu penyeleksian data atau informasi. Tahap ini penting dilakukan terutama data saat dimasukkan secara manual terjadi *error*.
3. Tahap pembuatan keputusan perawatan (*decision making process*)
Tahap pembuatan keputusan perawatan dalam CBM dapat dikelompokkan menjadi dua kategori yaitu diagnosis dan prognosis.

2.2.5 CBM Berbasis Getaran

Salah satu keunggulan dari CBM berbasis getaran yaitu dapat mengidentifikasi perkembangan cacat atau kerusakan suatu komponen mesin sebelum masuk pada tahap kerusakan berat. Semua mesin rotary dapat dipastikan menghasilkan getaran ketika berputar. Getaran yang ditimbulkan tersebut terdapat ukuran amplitudo pada frekuensi yang dapat memberikan informasi terkait keseimbangan poros, kesejajaran, kondisi gear dan bantalan, serta efek resonansi yang ditimbulkan oleh komponen lainnya. Analisis berbasis getaran merupakan metode yang tidak mengganggu selama mesin beroperasi secara normal (Negara, 2018).

2.2.6 Getaran

Getaran merupakan sebuah gerak bolak-balik (osilasi) suatu benda secara teratur melalui satu titik seimbang. Getaran sering disebut dengan gerak periodik, karena terjadi pergerakan suatu benda secara teratur. Kuat atau lemahnya gerakan suatu benda dipengaruhi oleh jumlah energi yang diberikan. Satu getaran sama dengan satu kali gerak bolak-balik yang terjadi secara penuh dari benda tersebut. Dalam hal ini gerak bolak balik dijelaskan pada gambar pegas 2.16 berikut ini.



Gambar 2.16 Gerakan osilasi atau gerak bolak-balik yang mendasari terjadinya sebuah getaran pada pegas (Negara, 2018)

Pegas pada gambar 2.16 tidak akan bergetar/bergerak sebelum diberi gaya terhadapnya. Apabila pegas tersebut diberikan gaya tarik sebesar F kemudian dilepas maka pegas akan bergetar dan bergerak bolak-balik disekitar sumbu netralnya.

2.2.7 Karakteristik Getaran

Sinyal getaran yang diperoleh dari proses analisis cacat atau kerusakan akan dikelompokkan dan dikuatkan sesuai bentuk karakter masing-masing. Pengelompokan ini dilakukan agar informasi dari cacat atau rusak yang ditunjukkan oleh sinyal getaran dapat diperoleh dengan mudah. Ada beberapa karakter getaran yang dipakai untuk

mengetahui permasalahan pengukuran getaran mesin yang dimonitor yaitu *acceleration*, *velocity*, dan *displacement*. Pengukuran getaran tersebut memiliki batas frekuensi agar memungkinkan dalam penggunaan salah satu dari tiga karakter getaran tersebut sesuai dengan pengukuran pada tingkat getaran. Ketiga karakter tersebut akan dijelaskan sebagai berikut :

a. *Displacement* (perpindahan)

Displacement merupakan jarak yang ditempuh oleh gerak bolak-balik dengan periode waktu tertentu. Pengukuran getaran yang dapat dilakukan ini hanya pengukuran *peak to peak displacement*, yaitu jarak dari nilai positif maksimum ke nilai negatif maksimum.

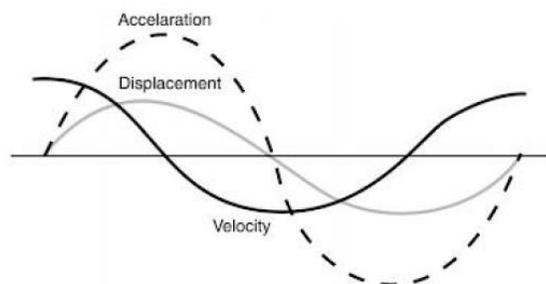
b. *Velocity* (kecepatan)

Velocity merupakan perubahan jarak per satuan waktu (per detik). Kecepatan tersebut selalu berubah-ubah sepanjang jarak tempuhnya. Kecepatan akan bernilai nol apabila terletak pada posisi positif maksimum dan negatif maksimum.

c. *Acceleration* (percepatan)

Acceleration merupakan kecepatan per satuan waktu (per detik). Percepatan tersebut selalu berubah-ubah sepanjang jarak tempuhnya. Pengukuran getaran percepatan hanya dapat dilakukan pada pengukuran percepatan getaran maksimum atau yang sering disebut *peak acceleration*.

Hubungan yang terbentuk dari ketiga karakter tersebut akan membentuk kurva sinusoidal seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 Kurva sinusoidal dari hubungan parameter *displacement*, *velocity*, dan *acceleration* (Paresh & Scheffer, 2004)

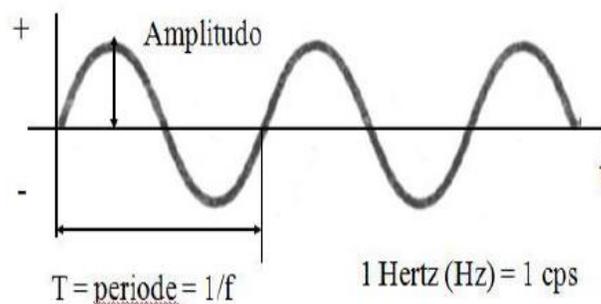
Getaran juga memiliki parameter sebagai tolak ukur dalam pengukuran getaran. Parameter tersebut akan dijelaskan sebagai berikut :

1. Amplitudo

Amplitudo merupakan ukuran titik tertinggi pada suatu gelombang. Ukuran titik tertinggi ini akan bernilai berbeda-beda setiap gelombang. Apabila ada dua buah gelombang yang mempunyai ukuran panjang gelombang yang sama, maka salah satu dari gelombang tersebut akan memiliki nilai puncak lebih tinggi atau bahkan lebih rendah dari gelombang yang lain (Paresh & Scheffer, 2004). Amplitudo dari sinyal getaran dapat digunakan untuk mengidentifikasi gangguan yang terjadi. Semakin tinggi amplitudo yang dihasilkan dari sinyal getaran menandakan semakin besar juga gangguan yang terjadi.

2. Frekuensi

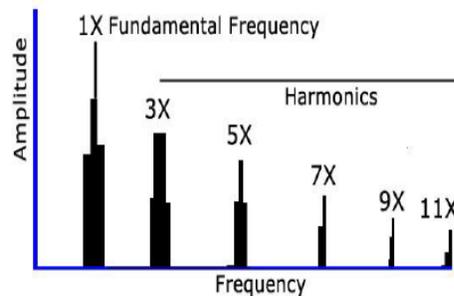
Frekuensi merupakan banyaknya jumlah siklus gelombang dalam satu putaran waktu (perdetik). Pada sebuah mesin frekuensi ini digunakan untuk menentukan letak kesalahan komponen mesin tersebut. Frekuensi dapat mengidentifikasi secara rinci cacat atau kerusakan komponen pada suatu mesin (Aji, 2007). Satuan dari frekuensi dapat dinyatakan dengan satuan *hertz* (Hz). Frekuensi dalam siklus gelombang dapat dilihat pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 Frekuensi dalam Siklus Gelombang (Negara, 2018)

3. Harmonik

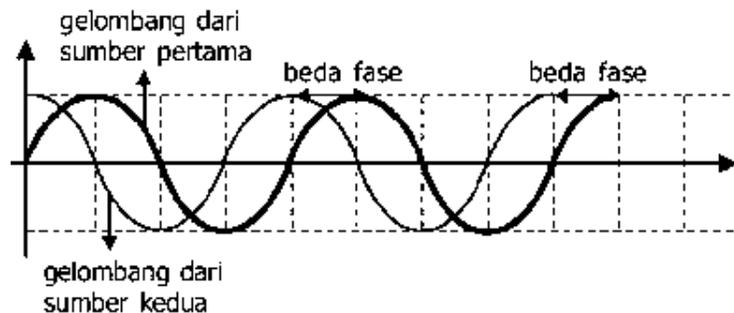
Harmonik merupakan gejala pembentukan gelombang yang memiliki nilai frekuensi yang berbeda dari bilangan frekuensi yang sama. Nilai frekuensi pada suatu gelombang sinyal getaran memiliki nilai harmonik, contohnya seperti pada frekuensi 10 Hz maka harmonik keduanya yaitu pada frekuensi 20 Hz dan seterusnya. Harmonik tersebut ditunjukkan seperti gambar 2.19.



Gambar 2.19 Frekuensi harmonik (Paresh & Scheffer, 2004)

4. Fase

Fase adalah titik point dalam waktu pada *waveform*, yang menunjukkan ukuran dari derajat sudutnya. Fase juga dapat diartikan sebagai perpindahan posisi dari bagian yang bergetar secara relatif sebagai penentuan titik awal dari getaran pada bagian lainnya (Adisty, 2014). Agar lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.20, dimana terdapat dua gelombang yang berbeda yaitu sinus dan cosinus. Masing masing gelombang tersebut memiliki titik awal yang berbeda, sehingga jika ditarik garis lurus tidak sejajar.

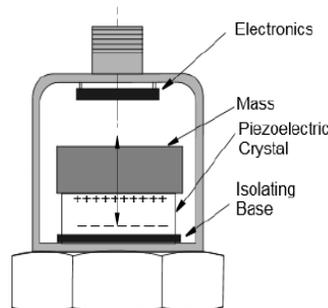


Gambar 2.20 Ilustrasi Fase (Budyanto, 2009)

2.2.8 Sensor Getaran

Dalam pengukuran getaran terdapat alat atau transduser yang digunakan untuk mengukur tingkat getaran yang ditimbulkan oleh suatu komponen yang dimonitor. Hasil yang diperoleh dalam pengukuran getaran ini nantinya akan digunakan sebagai data analisis untuk mengetahui kondisi dari komponen tersebut. Pada penelitian ini sensor yang dipilih untuk mengukur seberapa besar getaran yang dihasilkan dari bantalan bola pada *fan* aksial yaitu menggunakan sensor akselerometer jenis *piezoelectric*. Sensor akselerometer merupakan transduser yang mampu mendeteksi, mengukur suatu getaran, dan mengukur percepatan (Aji, 2007).

Piezoelectric accelerometer ini terdiri dari kristal dalam kotak dengan massa yang terpasang pada bodi akselerometernya seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.21. Kristal *piezoelectric* yang ada pada akselerometer ini dapat mengeluarkan tegangan yang kemudian dikonversi menjadi percepatan. Muatan listrik akan muncul pada permukaan keping kristal *piezoelectric* akibat adanya tekanan yang bekerja pada permukaannya.



Gambar 2.21 *Piezoelectric accelerometer* (Vogler, 2015)

Akselerometer ini dipilih karena jika frekuensi yang dihasilkan dari suatu komponen memiliki nilai yang meningkat, maka akan semakin baik jika menggunakan sensor akselerometer ini sebagai sensor getaran. Penggunaan sensor akselerometer ini banyak diterapkan dalam aplikasi *condition monitoring*. Kondisi ini biasanya digunakan pada komponen bantalan atau roda gigi saat mengalami cacat atau kerusakan yang akan menghasilkan getaran dan frekuensi tinggi, oleh karena itu

kondisi tersebut dapat dipantau menggunakan sensor akselerometer (Paresh & Scheffer, 2004). Terdapat beberapa hal yang harus diketahui dalam penggunaan akselerometer diantara yaitu:

a. Sensitivitas

Sensitivitas adalah seberapa jauh kepekaan dari sensor akselerometer terhadap kuantitas yang sedang diukur. Sensor akselerometer yang biasanya digunakan untuk memantau getaran dirancang dengan sensitivitas 100 mV/g. Akan tetapi, sensitivitas untuk aplikasi khusus seperti geofisika, analisis struktur, maupun untuk analisis mesin dengan kecepatan rendah juga tersedia (Paresh & Scheffer, 2004).

b. Rentang frekuensi

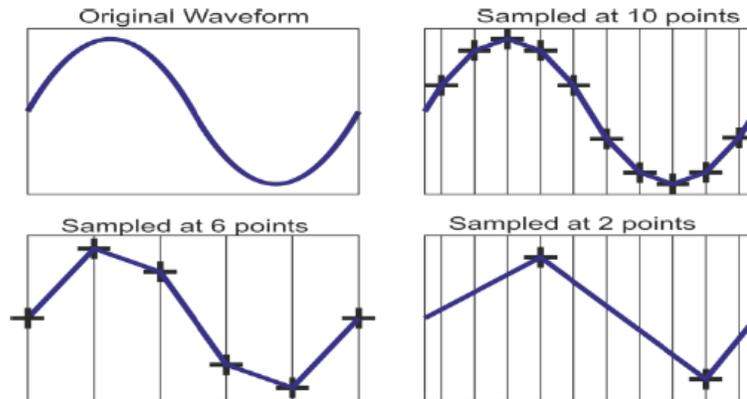
Sensor akselerometer dirancang untuk mengukur getaran pada rentang frekuensi tertentu. Saat rentang frekuensi dari suatu mesin telah diketahui, maka dapat dipilih akselerometer yang sesuai dengan rentang frekuensi tersebut. Sensor akselerometer yang biasanya digunakan untuk mengukur getaran mesin akan memiliki rentang frekuensi dari 1 atau 2 Hz sampai 8 atau 10 kHz. Akan tetapi sensor akselerometer dengan rentang frekuensi yang lebih tinggi juga tersedia (Paresh & Scheffer, 2004).

c. *Sampling rate*

Sampling rate merupakan jumlah *sample* yang direkam dalam satu detik. Semakin besar *sampling rate*-nya yang digunakan dalam merekam sebuah data getaran, maka sinyal getaran yang ditampilkan akan sesuai dengan aslinya. Ilustrasi *sampling rate* dapat dilihat pada gambar 2.22. Jika dilihat pada gambar 2.22, bentuk dari gelombang *original waveform* berbeda dengan yang lainya dikarenakan bentuk *waveform* sesuai berdasarkan jumlah *sampling rate* yang diberikan. Semakin rendah *sampling rate* yang diberikan maka bentuk dari gelombang tersebut akan jauh berbeda dari bentuk aslinya.

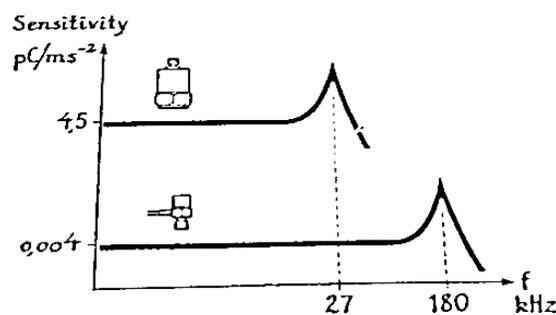
Fenomena pembentukan gelombang frekuensi rendah akibat dari *undersampling* sehingga bentuknya tidak seperti gelombang aslinya ini sering disebut dengan *aliasing*. Oleh karena itu, proses analisis biasanya sudah dilengkapi dengan

anti-aliasing filter yang merupakan low-pass filter yang memungkinkan untuk frekuensi rendah dapat terdeteksi dengan frekuensi yang lebih tinggi (Paresh & Scheffer, 2004).



Gambar 2.22 Sampling Rate (Negara, 2018)

Hubungan antara ukuran akselerometer terhadap rentang frekuensi dan sensitivitas dapat dilihat pada gambar 2.23. Saat akselerometer terkena tingkat akselerasi yang bernilai konstan, maka akselerometer tersebut akan memberikan sinyal keluaran konstan melalui rentang frekuensi yang sangat luas hingga mendekati nilai frekuensi resonansi. Secara umum hubungan antara ukuran akselerometer terhadap rentang frekuensi dan sensitivitas ini yaitu semakin besar akselerometer yang digunakan maka semakin tinggi nilai sensitivitasnya dan semakin kecil rentang frekuensi yang berguna.



Gambar 2.23 Hubungan antara ukuran akselerometer terhadap rentang frekuensi dan sensitivitas (Courrech, 1990)

d. Metode Pemasangan Sensor (*mounting*)

Hasil pengukuran akan didapatkan secara maksimal dengan memakai beberapa metode untuk pemasangan sensor akselerometer. Metode yang digunakan tersebut antara lain adalah :

1. Pemasangan *Stud*

Metode pemasangan *stud* merupakan metode yang paling baik untuk aplikasi pemasangan permanen. Metode ini dilakukan dengan cara menempelkan atau mengaitkan sensor pada *stud*. Metode ini memungkinkan transduser untuk mengukur getaran yang paling ideal.

2. Pemasangan dengan *Beeswax*

Metode pemasangan dengan *beeswax* ini merupakan pemasangan yang cepat dan digunakan pada penelitian ini untuk menempelkan akselerometer ke rumah bantalan pada fan aksial. *Beeswax* dapat digunakan dalam metode pemasangan sensor akselerometer untuk mengukur getaran diberbagai lokasi. Metode ini memiliki batas temperatur sekitar 40°C yang dapat digunakan, karena *beeswax* akan menjadi lunak apabila temperaturnya semakin tinggi.

3. Pemasangan dengan Magnet

Metode pemasangan sensor akselerometer dengan magnet merupakan pemasangan yang mudah dan cepat. Magnet yang digunakan yaitu magnet permanen yang dapat digeser dari satu posisi ke posisi lainnya. Namun metode ini hanya digunakan untuk survei karena memiliki rentang frekuensi yang terbatas yaitu sekitar 2,5 kHz. Kegunaan metode ini terbatas apabila digunakan pada permukaan feromagnetik dan rentang dinamik karena kekuatan dari magnet terbatas. Metode pemasangan yang dilakukan ini, magnet menyediakan isolasi listrik antara permukaan yang disatukan dan sensor akselerometer. Hal tersebutlah yang akan memicu timbulnya sinyal getaran dari komponen lainnya.

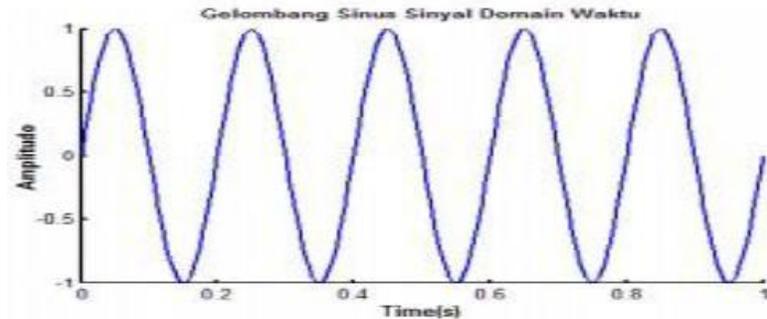
2.2.9 Sinyal Getaran

Sinyal getaran merupakan besaran fisik yang mempunyai variasi nilai terhadap waktu yang memuat sejumlah informasi tertentu dari kondisi suatu komponen mesin. Pengukuran getaran pada suatu komponen mesin memberikan informasi yang berbeda-beda sehingga diperlukan proses pengolahan data supaya proses analisis sinyal getaran yang ditampilkan oleh kerusakan yang dialami komponen mesin mudah dibaca. Analisis terkait data-data getaran mesin terdapat informasi yang dibutuhkan sebagai penentu dari kondisi suatu komponen mesin seperti, informasi letak kerusakan suatu mesin, informasi kondisi dari suatu mesin, dan penyebab terjadinya kerusakan suatu komponen mesin.

Menguraikan data sinyal getaran yang bertumpuk dan kompleks merupakan cara yang paling efektif pada saat proses analisis. Proses analisis tersebut memiliki dua analisis dasar yang secara umum sering digunakan untuk mengamati kerusakan pada suatu komponen mesin yaitu domain waktu dan domain frekuensi. Domain waktu merupakan cara memandang getaran sebagai simpangan terhadap waktu, biasanya pada domain waktu memberikan gambaran fenomena getaran secara fisik sedangkan frekuensi domain adalah cara memandang getaran yang berupa amplitudo sebagai fungsi dari frekuensi yang merupakan cara yang cocok untuk mengidentifikasi dari suatu komponen mesin (Aji, 2007). Kedua analisis tersebut dapat memunculkan tanda-tanda kerusakan meskipun sebagian besar belum terlihat jelas.

2.2.10 Domain Waktu (*Time Domain*)

Domain waktu merupakan grafik yang menunjukkan bentuk dan ukuran dari sinyal gelombang per satuan waktu. Domain waktu sering disebut dengan *time waveform* dalam dunia analisis getaran. Bentuk yang ditunjukkan oleh sinyal getaran berupa gelombang sinusoidal. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.24 yang menunjukkan bentuk dari gelombang sinus. Pada grafik sumbu x menunjukkan besarnya nilai waktu sedangkan pada sumbu y menunjukkan besar nilai dari amplitudo.



Gambar 2.24 Grafik gelombang sinus (Negara, 2018)

Gambar 2.24 merupakan bentuk dari sinyal getaran yang terjadi secara alamiah dalam domain waktu yang dihasilkan dari suatu mesin. Gelombang yang dihasilkan tersebut sangat berguna untuk proses analisis. Apabila dilihat pada grafik domain waktu tersebut indikasi kerusakan dari suatu komponen yang dimonitor tidak terlihat dengan jelas karena data yang diperoleh saling berhimpitan. Namun sinyal yang didapat dalam domain waktu tersebut sangat berguna untuk melakukan proses dasar pada analisis yang lebih lanjut (Aji, 2007).

2.2.11 Domain Frekuensi (Spektrum)

Domain frekuensi merupakan wadah lanjutan dari analisis sinyal getaran untuk hasil yang sudah diperoleh dan dikonversi pada domain waktu (Aji, 2007). Domain frekuensi tersebut dapat dilihat pada gambar 2.25. Grafik yang muncul pada domain frekuensi ini berupa amplitudo yang memiliki nilai yang berbeda-beda sesuai dengan besar dari getaran yang dihasilkan oleh mesin. Munculnya nilai amplitudo tersebut disebabkan oleh adanya getaran yang berlebih pada mesin tersebut sehingga dapat dijadikan sebagai indikator dalam menentukan kondisi dari suatu komponen mesin yang dimonitor.



Gambar 2.25 Domain Frekuensi (Negara, 2018)

2.2.12 Metode analisis Getaran

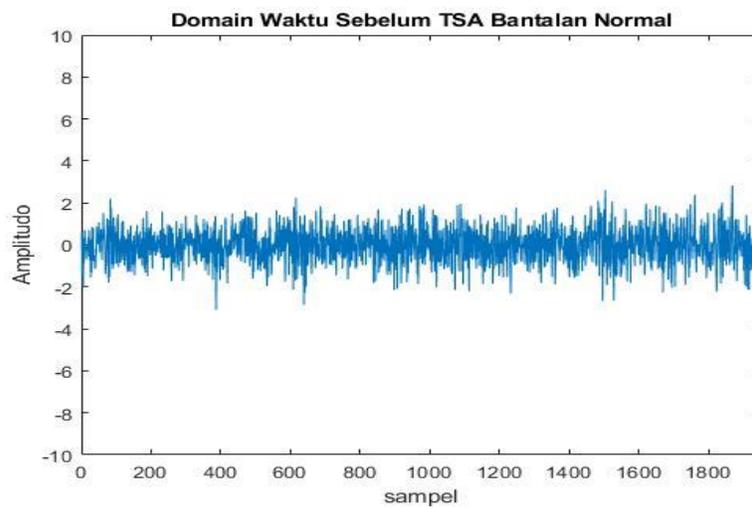
Saat melakukan analisis getaran, terdapat metode pendukung yang bermacam-macam yang saling berkaitan satu sama lain. Metode yang digunakan tersebut memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing saat melakukan pengolahan data sinyal getaran yang diperoleh. Oleh karena itu, penggunaan metode teknik kombinasi merupakan hal yang tepat dalam proses analisis kerusakan / cacat yang terjadi pada suatu komponen mesin.

2.2.13 Analisis Domain Waktu

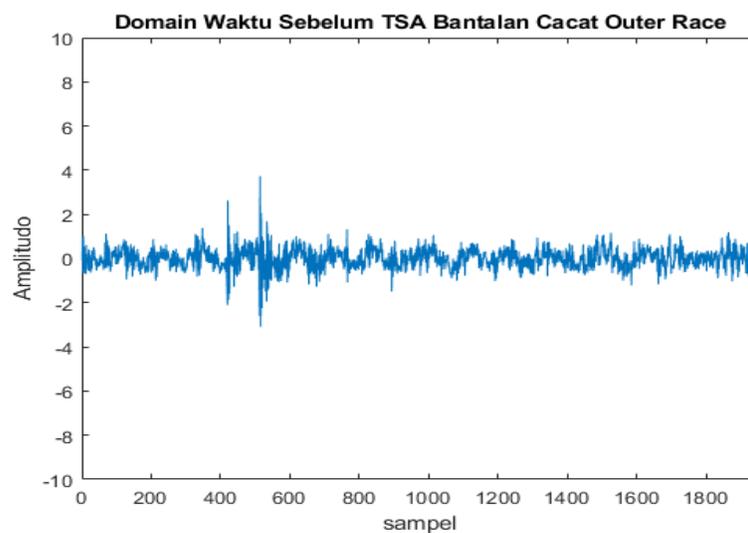
Secara umum data getaran yang didapat dari domain waktu merupakan rangkaian data dari percepatan, kecepatan, dan perpindahan. Ada beberapa metode analisis statistik deskriptif yang digunakan dalam time domain analisis yang dapat dipakai sebagai sumber informasi data sinyal. Metode tersebut contohnya seperti *root mean square* (RMS), *variance*, *kurtosis*, *crest factor*, *standart deviation*, dan *skewness* (Latuny, 2013). Beberapa metode statistik tersebut dapat digunakan untuk memberikan informasi terkait tingkat getaran dan kerusakan pada suatu komponen mesin yang dianalisis.

Hasil plot grafik domain waktu untuk kondisi bantalan normal dan bantalan cacat lintasan luar seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.26 dan 2.27. Kedua gambar tersebut diperoleh dari pengambilan data secara langsung pada *fan* aksial dengan

menggunakan data akuisisi dalam penelitian ini. Hasil dari plot grafik yang ditunjukkan pada gambar 2.26 menunjukkan bahwa belum ada kenaikan nilai amplitudo yang signifikan. Hal tersebut disebabkan oleh pengujian dilakukan pada bantalan normal (tanpa cacat). Sedangkan pada gambar 2.27 menunjukkan gambar hasil plot domain waktu pada pengujian bantalan dalam kondisi cacat pada bagian lintasan luarnya. Pada domain waktu bantalan cacat ini menunjukkan nilai amplitudo yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan domain waktu bantalan dalam kondisi normal.



Gambar 2.26 Hasil plot domain waktu pada kondisi bantalan normal



Gambar 2.27 Hasil plot domain waktu pada kondisi bantalan cacat lintasan luar

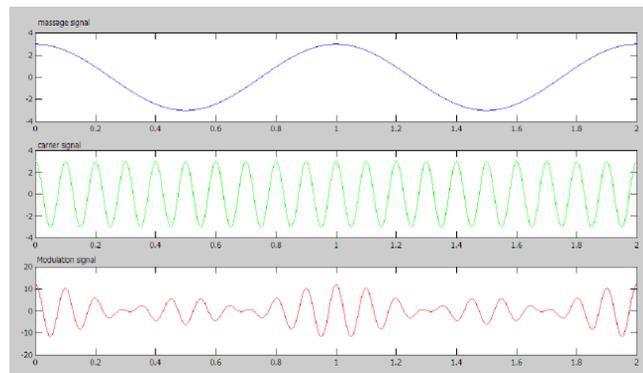
2.2.14 Analisis Domain Frekuensi

Analisis domain frekuensi merupakan prinsip dari transformasi sinyal getaran. Transformasi sinyal getaran ini dilakukan pada domain waktu ke domain frekuensi. Transformasi tersebut dilakukan karena pada analisis domain waktu untuk mengetahui tingkat kerusakan yang terjadi pada suatu komponen tidak terlihat secara jelas. Analisis domain frekuensi memberikan kemampuan dalam mengidentifikasi dan mengisolasi frekuensi dari suatu komponen. Analisis ini diterapkan pada frekuensi bantalan untuk memberikan informasi mengenai kondisi dari bantalan tersebut (Latuny, 2013).

Dalam analisis domain frekuensi, sinyal getaran yang telah melewati proses transformasi kemudian dilakukan proses isolasi dan identifikasi untuk memilih sinyal dari komponen-komponen yang diperlukan dalam melakukan diagnosis kerusakan pada komponen yang dianalisis. Ada beberapa metode yang dapat digunakan sebelum transformasi sinyal pada domain frekuensi yaitu metode *Fast Fourier Transform* (FFT) dan metode *Time Synchronous Averaging* (TSA).

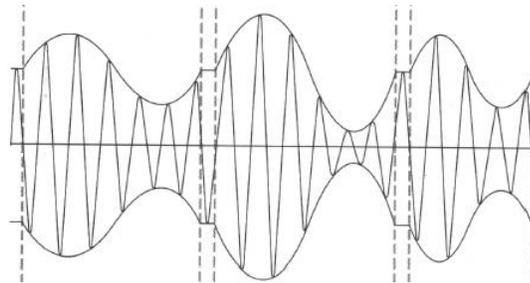
2.2.15 Amplitudo Modulasi

AM (*Amplitude Modulation*) merupakan suatu proses modulasi dengan cara mengubah bentuk amplitudo gelombang pembawa sesuai dengan bentuk gelombang informasi (Carrier, 1967). Secara umum gelombang pembawa dan gelombang informasi tersebut berbentuk gelombang sinusoidal seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.28 berikut ini.



Gambar 2.28 Amplitudo Modulasi (Carrier, 1967)

Salah satu bentuk sinyal dari amplitudo modulasi yaitu terdapat sideband seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.29. *Side bands* adalah suatu sinyal yang muncul akibat dari suatu modulasi dan mengambil tempat selebar spektrum frekuensi gelombang informasi yang memodulasi gelombang pembawa. *Side bands* biasanya terjadi pada bantalan bola yang mengalami cacat lintasan dalam (*inner race*). *Side bands* terjadi karena pada saat bantalan bola berputar, posisi bantalan cacat *inner race* ikut berputar sesuai dengan putaran poros. Saat cacat *inner race* pada bantalan bola berputar ke atas, beban yang ditumpu akan semakin ringan (relatif kecil) sehingga amplitudo yang muncul akan semakin rendah. Berbeda saat posisi cacat bantalan *inner race* berputar turun ke bawah, beban yang ditumpu akan semakin besar sehingga menghasilkan nilai amplitudo yang meningkat dan semakin tinggi.



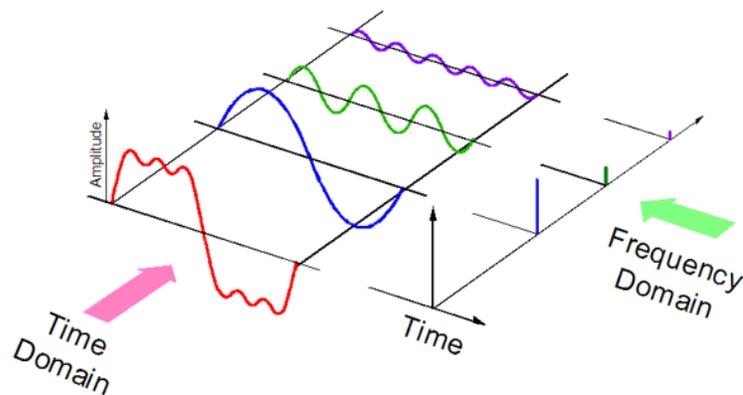
Gambar 2.29 *Side bands* (Negara, 2018)

2.2.16 *Fast Fourier Transform (FFT)*

Analisis *Fourier* merupakan istilah lain untuk transformasi gelombang yang semula sebagai fungsi terhadap waktu yang dikemudian diubah menjadi indikator amplitudo yang berbanding dengan nilai frekuensi (Negara, 2018). Analisis tersebut merupakan teknik penyelesaian matematis yang sangat teliti yang mentransformasikan bentuk gelombang dari domain waktu menjadi domain frekuensi sebagai analisis indikator dengan cara *fast fourier transform (FFT)*. Hasil yang diperoleh dalam proses FFT pada domain waktu akan menghasilkan sebuah grafik spektrum frekuensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.30.

Fast Fourier Transform (FFT) merupakan metode yang efektif untuk mendeteksi dan mengidentifikasi kesalahan getaran pada mesin rotary (Paresh & Scheffer, 2004). FFT dapat menghasilkan spektrum kompleks dari sinyal sampel dengan cara transformasi domain waktu ke domain frekuensi. FFT mampu menampilkan hasil spektrum dari rentang frekuensi nol sampai setengah frekuensi sampel. Keuntungan menggunakan FFT yaitu dapat mengevaluasi pengukuran *multi channel*. Keuntungan lain dari menggunakan FFT yaitu dapat mengevaluasi analisis sitem seperti, kohesi, respon frekuensi, dan korelasi. FFT merupakan algoritma yang cukup efisien untuk mempercepat konversi dengan menghasilkan *discrete fourier tarnsform* (DFT).

Data yang dihasilkan dalam domain frekuensi pada umumnya dapat menunjukkan kesalahan pada mesin karena karakteristik dari komponen frekuensi. Menggunakan konsep FFT sinyal getaran dari komponen mesin dapat dianalisis dalam bentuk gelombang sinus pada domain frekuensi yang frekuensinya merupakan frekuensi dasar dan harmoniknya. Pengolahan data frekuensi tersebut umumnya bertujuan untuk memonitor atau mendeteksi kondisi dari suatu komponen mesin.



Gambar 2.30 Proses Transformasi dari Domain Waktu ke Domain Frekuensi (Negara, 2018)

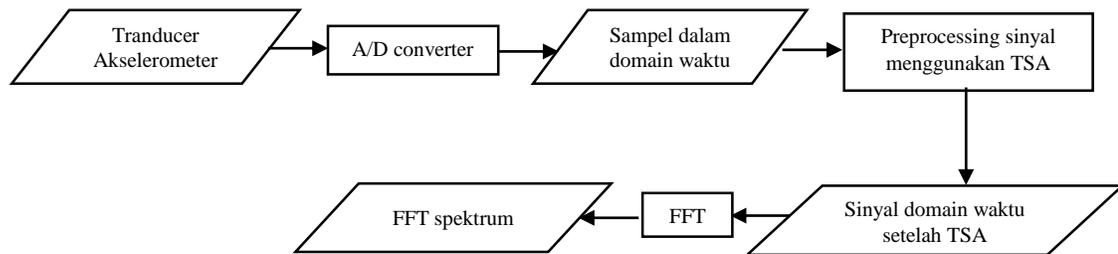
Frekuensi sebuah bantalan biasanya muncul pada frekuensi tinggi. Frekuensi tersebut cenderung terdapat banyak *noise* yang bisa mengganggu proses analisis data

sehingga metode FFT kurang efektif jika digunakan untuk menganalisis data. *Noise* tersebut harus direduksi agar cacat pada bantalan akan terlihat jelas. Salah satu metode yang bisa digunakan adalah analisis menggunakan metode *Time Synchronous Averaging* (TSA).

2.2.17 Time Synchronous Averaging (TSA)

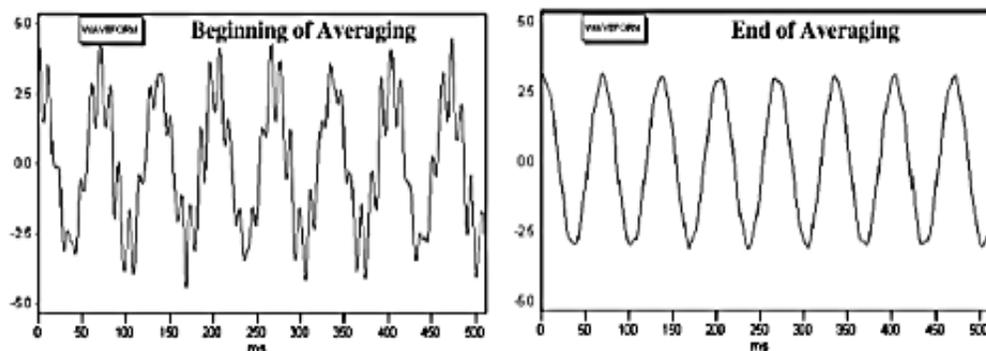
Secara umum sinyal getaran dari mesin rotary tidak sepenuhnya deterministik, tetapi beberapa memiliki *noise* acak yang ditumpangkan di atasnya. Karena *noise* tersebut tidak dapat diprediksi, *noise* tersebut dapat mengubah bentuk spektrum, dan dalam banyak kasus dapat merusak bentuk spektrum secara serius. Jika serangkaian spektrum dirata-ratakan secara bersamaan, maka *noise* akan berangsur-angsur menurun dan membuat bentuk yang halus sehingga puncak spektrum akan menonjol dan levelnya akan lebih akurat karena deterministik bagian dari sinyal. Namun perlu dicatat bahwa rata-rata spektrum FFT tidak dapat mengurangi tingkat *noise* tetapi hanya melancarkannya. Sehingga diperlukan metode untuk mereduksi atau mengurangi *noise* agar saat proses analisis data lebih mudah. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mereduksi *noise* yaitu *Time Synchronous Averaging* (TSA).

TSA atau sinkronisasi waktu rata-rata merupakan proses yang secara fundamental berbeda dari rata-rata spektrum biasa yang umumnya dilakukan dalam analisis *Fast Fourier Transform* (FFT). Hal ini karena memerlukan operasi terpisah untuk setiap rangkaian harmonik yang berbeda dalam sinyal termasuk *resampling* terpisah dalam setiap kasus sehingga memberikan jumlah bilangan sampel yang ditentukan per periode dan jumlah periode bilangan bulat yang akan dirata-ratakan. Dalam prakteknya hal tersebut dilakukan dengan melakukan perata-rataan secara bersamaan serangkaian segmen sinyal masing-masing sesuai dengan satu periode sinyal sinkronisasi (Randall & Antoni, 2011). Gambar 2.31 merupakan skema proses dari metode TSA.



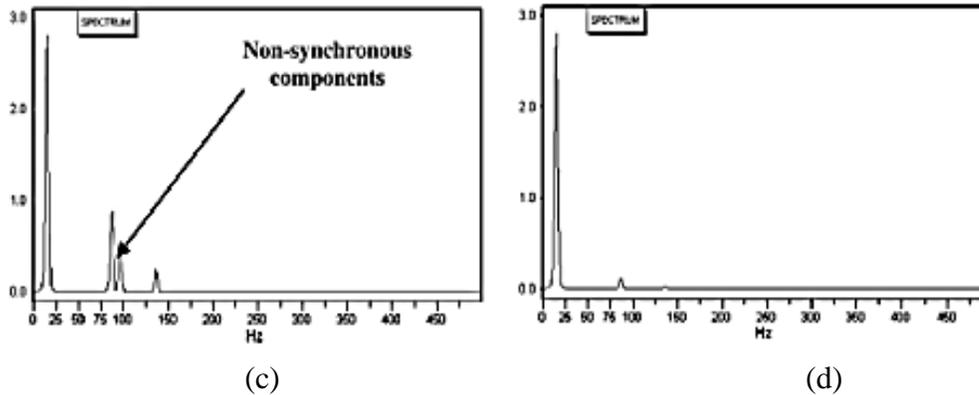
Gambar 2.31 Skema Proses TSA

TSA digunakan untuk mengurangi atau mereduksi efek *noise* yang tidak diinginkan dalam pengukuran. Apabila menggunakan TSA, blok-blok waktu rekaman dipicu oleh *tachometer* dari sinyal referensi yang diinginkan dan rata-rata terjadi dalam domain waktu. Bentuk gelombang yang sinkron dengan referensi akan cenderung diperkuat bingkai demi bingkai. Sedangkan untuk yang acak atau sinkron pada tingkat yang berbeda tidak diperkuat dan rata-rata bernilai nol. Setelah rata-rata yang cukup dalam domain waktu, FFT tunggal kemudian dilakukan dan hasilnya sering disebut dengan spektrum sinkronisasi dimana kelipatan bilangan tidak bulat dari kecepatan berjalan dihilangkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.32. Menggunakan metode ini, signal to noise ratio (SNR) atau (S/N) akan meningkatkan proporsional terhadap akar kuadrat dari jumlah rata-rata yang diambil. Secara teoritis, semua komponen *noise* bisa dihilangkan dengan rata-rata untuk jangka waktu yang panjang (Rahman, Chao, & Ismail, 2011).



(a)

(b)



Gambar 2.32 (a) Grafik sinyal domain waktu sebelum dilakukan TSA, (b) Grafik sinyal domain waktu sesudah dilakukan TSA, (c) Grafik sinyal spektrum sebelum dilakukan TSA, (d) Grafik sinyal spektrum setelah dilakukan TSA (Rahman, dkk 2011)

Pada gambar 2.32 (a) dan (b) terlihat jelas perbedaan antara yang menggunakan analisis TSA dan tidak. Grafik domain waktu yang tidak menggunakan analisis TSA cenderung terdapat banyak *noise* yang mengganggu proses analisis data, sedangkan grafik yang menggunakan analisis TSA bentuk gelombang yang dihasilkan tampak lebih halus karena *noise* sudah tereduksi. Untuk gambar 2.32 (c) dan (d) terlihat jelas perbedaannya. Grafik spektrum yang tidak menggunakan analisis TSA cenderung memiliki banyak *noise* sehingga pengidentifikasian data terganggu, oleh karena itu, dilakukan analisis TSA untuk mereduksi *noise* tersebut sehingga pada saat identifikasi kondisi dari komponen mesin *fan* aksial contohnya seperti poros, bantalan, *blade* akan terlihat jelas nilai amplitudo yang dihasilkan.

Pada penelitian ini digunakan metode analisis menggunakan *Time Synchronous Averaging* (TSA) karena metode ini dianggap efektif dalam mereduksi *noise*. Apabila *noise* telah tereduksi maka komponen yang akan di analisis akan terlihat secara jelas pada spektrum frekuensi. Komponen yang terlihat dengan jelas tersebut akan diidentifikasi apakah terjadi kerusakan atau masih dalam keadaan baik (normal).