

DETEKSI MULTI-KERUSAKAN POMPA MENGUNAKAN *ACCELEROMETER ARRAY*

Nama Mahasiswa : Anisatul Fauziyah
NRP : 2412105008
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Dhany Arifianto, ST., M.Eng

Abstrak

Pengukuran getaran umumnya dilakukan pada mesin yang sedang beroperasi tetapi ketika terdapat dua mesin atau lebih yang beroperasi dalam satu pondasi apakah hasil dari pengukuran benar-benar menggambarkan kondisi mesin. Sehingga diperlukan deteksi kerusakan pompa yang dipengaruhi transmissibilitas getaran pompa lain dalam satu pondasi menggunakan *accelerometer array*. Deteksi kerusakan dilakukan dengan mengukur getaran pompa yang berada pada satu pondasi. Dari hasil penelitian membuktikan bahwa *transmissibility* dapat dideteksi menggunakan *accelerometer array* dibuktikan dengan adanya perubahan diagnosa kerusakakn pompa yang dilihat pada spektrum *Fast fourier transform*. Nilai *transmissibility* yang bernilai negatif menunjukkan superposisi destruktif misalkan pada pompa misalignment 2mm (yang dioperasikan dengan pompa *unbalance 27 gram.cm*) dengan nilai *transmissibility* -7.7296 dB. Sedangkan *transmissibility* yang bernilai positif menunjukkan superposisi konstruktif misalkan pada pompa *bearing fault* (yang dioperasikan dengan pompa *unbalance 27 gram.cm*) dengan nilai 3.6719 dB.

Kata Kunci: *Deteksi Kerusakan Pompa, Transmissibility, Accelerometer Array, Perhitungan Transmissibility, Fast Fourier Transform, Superposisi.*

DETECTION OF MULTI DAMAGE ON THE PUMP USING THE ACCELEROMETER ARRAY

Student Name : Anisatul Fauziyah
NRP : 2412105008
Department : Engineering Physics-ITS
Supervisor : Dr. Dhany Arifianto

Abstract

Vibration measurement is generally performed on a running rotating machine but when there are two or more machines that operate in a foundation, if the results of the measurements really describe the condition of the engine. Therefore its necessary to detection of damage pump that affected from vibration transmissibility another pumps in a foundation using accelerometer array Detection of the damage performed by measuring the vibration of the pump that is at the foundation. From the results of the study prove that the transmissibility can be detected using an accelerometer arrays evidenced by the change in the pump damage diagnosis are seen in spectrum of the Fast Fourier Transform .Detection of the damage performed by measuring the vibration of the pump that is at a foundation. Transmissibility value that is negative indicates a destructive superposition example the pump misalignment of 2mm (which is operated by the pump 27 gram. cm) with result a value of -7.7296 dB transmissibility. While a positive value in transmissibility indicates that constructive superposition example the pump bearing fault (unbalance pump operated with 27 gram. cm) with a value of 3.6719 dB.

Keywords: *Detection of damage pump, Transmissibility, Accelerometer Array, Calculation of Transmissibility, Fast Fourier Transform, Superposition.*

**DETEKSI MULTI KERUSAKAN PADA POMPA
MENGUNAKAN ACCELEROMETER ARRAY**

TUGAS AKHIR

Oleh:



Anisatul Fauziah
NRP. 2412 105 008

Surabaya, Juli 2014

Pembimbing



Dr. Dhany Arifianto ST, M.Eng
NIP. 19731007 199802 1 001

Ketua Jurusan
Teknik Fisika FTI-ITS



Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA
NIP. 19650309 19902 1 001

DETEKSI MULTI KERUSAKAN PADA POMPA MENGUNAKAN ACCELEROMETER ARRAY

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

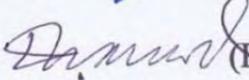
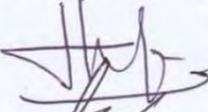
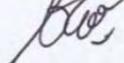
Bidang Studi Rekayasa Akustik dan Fisika Bangunan
Program Studi Lintas Jalur S1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

ANISATUL FAUZIYAH

NRP. 2412 105 008

Disetujui oleh Tim penguji tugas akhir :

1. Dr. Dhany Arifianto ST, M.Eng  (Pembimbing)
2. Ir. Wiratno Argo Asmoro, M. Sc  (Penguji I)
3. Ir. Tutug Dhanardhono, MT  (Penguji II)
4. Ir. Heri, MT  (Penguji III)
5. Irwansyah ST, MT  (Penguji VI)

SURABAYA

Juli 20014

DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 2.1	6
Persamaan 2.2	6
Persamaan 2.3	6
Persamaan 2.4	8
Persamaan 2.5	8
Persamaan 2.6	8
Persamaan 2.7	9
Persamaan 2.8	9
Persamaan 2.9	9
Persamaan 2.10	9
Persamaan 2.11	9
Persamaan 2.12	9
Persamaan 2.13	9
Persamaan 2.14	10
Persamaan 2.15	10
Persamaan 2.16	10
Persamaan 2.17	10
Persamaan 2.18	19
Persamaan 2.19	20
Persamaan 2.20	20
Persamaan 2.21	23
Persamaan 2.22	23
Persamaan 2.23	24

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Predictive Maintenance

Predictive maintenance merupakan jenis perawatan mesin dengan menjadwalkan aktivitas *maintenance* ketika terdeteksi kerusakan mesin. Perawatan ini menggunakan alat monitoring untuk mendapat informasi langsung tanpa mengganggu operasi mesin. Perawatan jenis ini termasuk “*condition – based maintenance*” dimana *maintenance* akan dilakukan ketika terdeteksi perubahan kondisi mesin dapat sehingga tindakan yang bersifat proaktif dapat segera dilakukan sebelum terjadinya kerusakan mesin. (ISO 13373, 2004)

Kondisi mekanik dan operasional mesin harus dimonitoring secara periodik dan ketika *trend* menunjukkan adanya abnormal terjadi bagian kerusakan pada mesin harus diidentifikasi dan dijadwalkan untuk *maintenance* .

2.2 Teori Getaran

Getaran dalam pengertian umum diartikan sebagai gerakan yang berulang pada titik setimbang setiap selang waktu tertentu. Selang waktu untuk mengulang gerakan tersebut disebut periode getaran. Jumlah gerakan yang dilakukan setiap satu detik adalah frekuensi. Tinggi rendahnya gelombang disebut amplitudo.

Secara umum terdapat dua kelompok getaran yaitu getaran bebas dan getaran paksa. getaran bebas terjadi jika sistem bergetar karena bekerjanya gaya yang ada di dalam sistem tersebut tanpa adanya gaya luar. Sistem yang bergetar bebas akan bergetar pada satu atau lebih frekuensi dari naturalnya. Getaran paksa terjadi jika sistem bergetar akibat rangsangan gaya luar. Jika gaya luar juga bergetar, maka gaya luar akan memaksa sistem untuk bergetar pada frekuensi gaya luar. (Saktyo, Haris 1997)

Pergerakan massa saat bergetar direpresentasikan pada gerakan satu putaran. Pada satu putaran tersebut terdapat banyak informasi yang dapat diketahui melalui pengukuran sistem. Gerak tersebut merupakan gerak periodik dan harmonik, dimana

hubungan antara simpangannya (X) dengan massa (m) dan waktu (t) dapat dilihat dalam persamaan sinus:

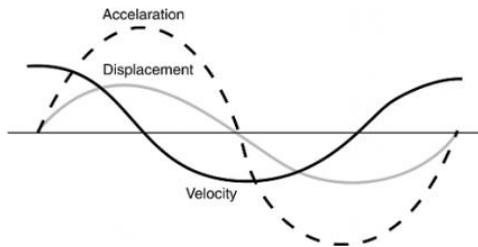
$$X = X_0 \sin \omega t \quad (2.1)$$

Selain simpangan (*displacement*) ada dua besaran lainnya yang digunakan untuk menganalisa getaran, yakni kecepatan (*velocity*) dan percepatan (*acceleration*).

$$V = \frac{dX}{dt} = X_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (2.2)$$

$$a = \frac{dV}{dt} = -X_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \quad (2.3)$$

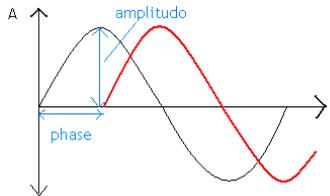
Bentuk gelombang dari ketiga komponen besaran Getaran tersebut dapat ditunjukkan gambar 2.1 dimana simpangan menunjukkan kurva sinus, kecepatan menunjukkan kurva *cosinus* dan percepatan menunjukkan kurva sinus.



Gambar 2.1 *Waveform* Simpangan, Kecepatan dan Percepatan (Girdhar, Paresh, 2004)

Tiga parameter utama untuk menggambarkan sinyal Getaran adalah amplitudo, frekuensi dan *phase*. Amplitudo merupakan simpangan maksimum getaran, pada persamaan 2.1 disimbolkan dengan X_0 . Amplitudo diukur dengan tiga cara, *displacement* (mills, micron), *velocity* (ips, mm/s) dan *acceleration* (g, mm/s²,

inch/s²). Frekuensi merupakan banyaknya getaran yang terjadi dalam satu satuan waktu. Satuan frekuensi adalah Hz, cps, cpm dan RPM. *Phase* adalah perbedaan posisi dari getaran dari sebuah titik relatif terhadap titik referensi yang diam atau relatif terhadap titik lain yang bergetar.



Gambar 2.2 Amplitudo, Frekuensi dan Fasa
(Dian, Nur.2011)

Pada gambar 2.2 diatas menunjukkan ketiga parameter getaran yang dapat digunakan untuk mencari karakteristik dari getaran. Dengan melakukan analisa sinyal getaran akan diperoleh informasi yang dapat digunakan untuk menentukan kondisi mesin.

2.2.1 Superposisi Getaran Harmonis

Superposisi pada getaran harmonik yaitu gabungan dari dua gerak harmonik atau penjumlahan simpangan dari dua getaran harmonik dalam waktu yang sama. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi hasil superposisi gelombang yaitu amplitudo, frekuensi, fasa dan kecepatan sudut. (Aris, Surya. 2010)

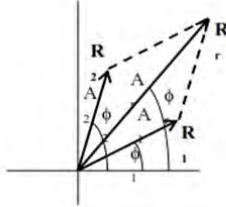
Untuk menentukan superposisi dari fungsi sinusoidal digunakan diagram fasor sehingga didapatkan resultan dari perpaduan gelombang. dalam diagram fasor masing-masing fungsi dinyatakan sebagai sebuah vektor. sedangkan resultan dari fungsi-fungsi sinusoidal tersebut sama dengan resultan vektor dari diagram fasor. (Saktyo, Haris 1997)

$$X_1 = A_1 \cos (\omega t + \phi_1) \quad (2.4)$$

$$X_2 = A_2 \cos (\omega t + \phi_2) \quad (2.5)$$

$$X_t = A_t \cos (\omega t + \phi_t) \quad (2.6)$$

Jika persamaan gelombang satu (2.4) dan persamaan dua (2.5) digabung maka superposisi dari kedua gelombang tersebut adalah resultan dari dua gelombang itu(2.6).



Gambar 2.3 Ilustrasi Superposisi Dua Gelombang

Pada gambar 2.3 menunjukkan amplitudo dari hasil superposisi dua gerak harmonik dinyatakan oleh A_r dimana panjang A_r sama dengan panjang vektor resultan R_r dari dua buah vektor R_1 dan R_2 . Vektor R_1 dan R_2 merepresentasikan masing-masing gerak harmonik yaitu X_1 dan X_2 . Panjang vektor R_1 adalah A_1 dan panjang vektor R_2 adalah A_2 dimana A_1 dan A_2 adalah amplitudo dari masing-masing gerak harmonik.

Terdapat beberapa macam superposisi dari dua getaran dibedakan berdasarkan parameter getaran, misalkan perpaduan dua getaran dengan frekuensi sudut yang sama. Jika terdapat dua buah getaran yang mempunyai frekuensi sudut ω yang sama tetapi mempunyai amplitudo R dan fasa ϕ sehingga mempunyai persamaan berikut :

$$X_1 = A_1 \sin(\omega t + \phi_1) \quad (2.7)$$

$$X_2 = A_2 \sin(\omega t + \phi_2) \quad (2.8)$$

Sehingga superposisi kedua getaran tersebut dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$X = R \sin(\omega t + \phi) \quad (2.9)$$

dimana

$$R = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (2.10)$$

$$\tan \phi = \frac{A_1 \sin \phi_1 + A_2 \sin \phi_2}{A_1 \cos \phi_1 + A_2 \cos \phi_2} \quad (2.11)$$

Persamaan 2.10 dan 2.11 menyatakan superposisi dari dua buah getaran yang berbeda amplitudo dan fasa tetapi mempunyai frekuensi sudut yang sama. Contoh lain yaitu perpaduan banyak getaran dengan frekuensi sudut sama. Untuk n buah getaran yang dipadukan dan mempunyai frekuensi sudut sama, masing-masing getaran dinyatakan dalam persamaan 2.14. Jika terdapat terdapat banyak getaran yang disimbolkan sebagai X_1, X_2 sampai dengan X_n yang dipadukan maka akan didapatkan superposisi getaran yang disimbolkan R dimana R adalah penjumlahan dari gelombang sinus dan cosinus dari banyak gelombang.

$$X_1 = A_1 \sin (\omega t + \phi_1) \quad (2.12)$$

$$X_2 = A_2 \sin (\omega t + \phi_2) \quad (2.13)$$

sampai dengan

$$X_n = A_n \sin (\omega t + \phi_n) \quad (2.14)$$

Persamaan superposisi getaran tersebut adalah :

$$X = R \sin (\omega t + \phi); \text{ dimana} \quad (2.15)$$

$$R = \sqrt{(\sum_1^n A_n \cos \phi_n)^2 + ((\sum_1^n A_n \sin \phi_n)^2)} \quad (2.16)$$

$$\tan \phi = \frac{\sum A_n \sin \phi_n}{\sum A_n \cos \phi_n} \quad (2.17)$$

Persamaan 2.16 adalah persamaan untuk mendapatkan amplitudo dan persamaan 2.17 untuk mendapatkan sudut fasa dari superposisi getaran.

2.3 Analisa Vibrasi

Analisa vibrasi adalah salah satu teknik yang sering digunakan dalam melakukan teknik prediktif mesin berputar. Teknik ini memanfaatkan karakteristik getaran yang dibangkitkan oleh mesin berputar. Beberapa kerusakan yang sering muncul pada mesin berputar adalah *bearing fault*, *unbalance* dan *misalignment*, beberapa kerusakan tersebut memiliki karakteristik khusus dalam pola sinyal vibrasi yang dibangkitkan.

Getaran mempunyai tiga parameter penting yang dapat dijadikan sebagai tolok ukur yaitu amplitudo, frekuensi, dan fasa. Amplitudo adalah ukuran atau besarnya sinyal vibrasi yang dihasilkan atau mengidentifikasi besarnya gaya yang dihasilkan dari getaran. Makin tinggi amplitudo yang ditunjukkan, menandakan makin besar gangguan yang terjadi. Besarnya amplitudonya bergantung pada tipe mesin dan kerusakan. Kenaikan amplitudo pada frekuensi tertentu mengidentifikasi jenis-jenis gangguan yang terjadi pada bagian mesin. Dengan diketahuinya frekuensi pada saat mesin mengalami vibrasi, maka penelitian atau pengamatan secara akurat dapat dilakukan untuk mengetahui penyebab atau sumber dari permasalahan.

Kenaikan tingkat getaran mesin dapat dilihat melalui trend pengukuran. Ketika tingkat getaran mesin bertambah melampaui sinyal *baseline* maka perlu dilakukan penanganan khusus pada mesin. Data *baseline* merupakan sekumpulan data yang didapatkan melalui pengukuran pada saat mesin beroperasi dengan stabil, sehingga data *baseline* berfungsi sebagai pembandingan data pengukuran untuk menentukan kondisi mesin. Sedangkan untuk mengetahui tingkat kerusakan atau keparahan dari mesin berputar digunakan standar untuk mengevaluasi kerusakan berdasarkan kelas dan tipe mesin, salah satu standar pengukuran getaran yaitu *International Organization for Standardization* (ISO).

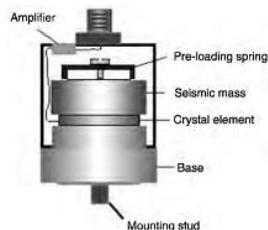
2.4 Pengukuran Getaran Menggunakan *Accelerometer*

Terdapat dua tipe dasar dari transduser untuk pengukuran getaran yaitu yang pertama adalah perangkat seismik yang biasanya dipasang pada struktur mesin dan output transduser merupakan hasil pengukuran dari getaran mutlak struktur, contoh *accelerometer* dan *velocity* transducer. Yang kedua adalah transduser perpindahan relatif yang mengukur perpindahan getaran dan posisi rata-rata antara rotor dan non-rotating elemen mesin contoh dari transduser ini yaitu *proximity probe displacement*. Pemilihan transduser digunakan berdasar kebutuhan dan spesifikasi mesin, sehingga didapatkan hasil pengukuran lebih akurat.

2.4.1 *Accelerometer*

Accelerometer adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk mengukur percepatan getaran sebuah sistem. Secara umum *accelerometer* dipasang pada bagian stasioner (*non rotating*) pada sistem. Berdasarkan ISO 13373 terdapat range frekuensi untuk *accelerometer* yaitu 0,1 Hz sampai dengan 30 kHz, untuk range massa yaitu 10 g sampai dengan 200 g dan tipe *range* suhu dengan amplifier adalah sampai 250°C.

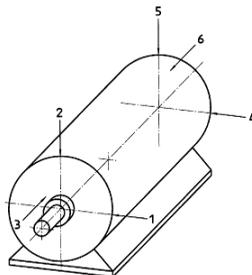
Cara kerja dari *accelerometer* yaitu dengan mengubah gerak mekanik menjadi sinyal tegangan. Sinyal tegangan yang di konversi sebanding dengan percepatan getaran yang menggunakan prinsip *piezoelektrik*. *Accelerometers* terdiri dari kristal *piezoelektrik* (terbuat dari bahan *feroelektrik*), massa seismik yang dilapisi logam.



Gambar 2.4 *Accelerometer* (Paresh, Girdhar,2004)

Ketika *accelerometer* terkena getaran massa memberikan gaya berulang-ulang pada kristal *piezoelektrik* yang berbanding lurus dengan percepatan getaran. Kemudian kristal *piezoelektrik* menghasilkan muatan yang sebanding dengan kekuatan getaran yang berbeda-beda. Hasil sensing diukur dalam *coulomb* per *Pico* - g (pC / g) di mana g adalah percepatan gravitasi. Beberapa sensor memiliki *amplifier* internal ada juga yang memiliki *amplifier* eksternal. *Amplifier* mengubah keluaran dari kristal menjadi tegangan proporsional dalam mV / g.

Tranduser getaran dipasang pada bagian-bagian mesin yang cukup kaku untuk menghindari efek resonansi lokal bagian tersebut. Pengambilan data-data dengan tranduser harus terlebih dahulu mengetahui bagian mesin yang paling tepat untuk pengukuran vibrasi. Tempat yang paling tepat tersebut adalah pada tempat yang dekat dengan sumber vibrasi, misalnya pada kerusakan *bearing* maka penempatan tranduser diletakkan pada *bearing caps* (rumah *bearing*). Pengambilan data vibrasi dilakukan dengan dua posisi yaitu dengan posisi *axial* dan posisi radial. Pengambilan data secara *axial* adalah menempatkan alat tranduser pada arah *axial* atau searah dengan poros. Cara radial sendiri terbagi menjadi 2 cara, yaitu pengukuran secara horizontal dengan cara meletakkan alat tranduser secara horizontal misalnya pada bagian atas pompa dan pengambilan data secara vertikal, yaitu dengan menempatkan alat tranduser pada posisi vertikal atau berbanding 90° dengan arah horizontal pada pompa.



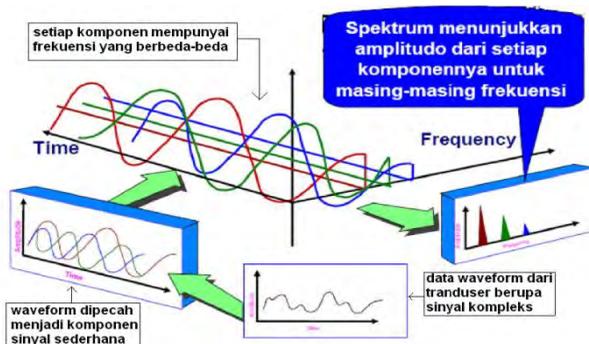
Gambar 2.5 Titik Pengukuran Getaran pada Sumbu Vertikal-2, Horizontal-1 dan Axial-3 (ISO 10816-1:1995)

Pengambilan data pada tiga sumbu berfungsi untuk melihat kondisi vibrasi pada masing-masing sumbu, karena disetiap sumbu mempunyai vibrasi yang berbeda. Pada setiap kondisi mesin dapat ditentukan karakteristis kerusakan dengan melihat sinyal vibrasi dari masing-masing sumbu pengukuran.

2.5 Analisa Vibrasi dengan Algoritma *Fast Fourier Transform*

Analisis *Fourier* merupakan cara untuk mempresentasikan gelombang kedalam spektrum amplitudo dengan nilai frekuensi. analisis spektrum getaran yang umum digunakan menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT). Analisa *fourier* terbagi atas dua yakni deret *fourier* untuk sinyal periodik dan transformasi *fourier* untuk sinyal aperiodik. Setiap sinyal periodik dapat dinyatakan oleh jumlahan atas komponen-komponen sinyal sinusoidal dengan frekuensi berbeda. Jika ada sebuah fungsi $f(t)$ yang kontinu periodik dengan periode T , bernilai tunggal terbatas dalam suatu interval terbatas, memiliki diskontinuitas yang terbatas jumlahnya dalam interval tersebut dan dapat diintegrasikan secara mutlak, maka $f(t)$ dapat dinyatakan dengan deret *fourier*. Dengan menggunakan *software* komputer, komputasi FFT menjadi lebih mudah dan cepat. (Dian,Nur. 2011)

FFT merupakan elemen pemrosesan sinyal pada pengukuran vibrasi. Pada pengukuran vibrasi ada empat tahapan untuk merubah sinyal vibrasi menjadi spektrumnya. Tahapan dalam algoritma FFT untuk analisa vibrasi dapat diilustrasikan dengan gambar 2.6.



Gambar 2.6 Proses Pencacahan pada FFT(Dian,Nur. 2011)

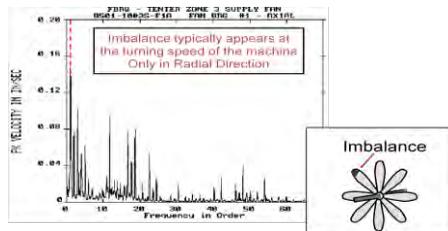
Getaran pada sistem dalam bentuk *displacement*, kecepatan dan percepatan dimana ketiga bentuk tersebut dapat dipresentasikan dalam domain waktu dan frekuensi. representasi dalam domain waktu menampilkan perubahan fisis getaran berdasar waktu. sedangkan domain waktu merupakan amplitudo yang ditampilkan dalam gelombang sinus/cosinus. dimana mempunyai magnitud dan fasa yang berubah-ubah terhadap frekuensi.

2.6 Jenis Kerusakan pada Mesin Berputar

Setiap bagian dari pompa atau mesin berputar mempunyai tingkat vibrasi yang berbeda tergantung pada letaknya dan gaya yang diterima. Tingkat vibrasi inilah yang bisa dijadikan sebagai pendeteksi keadaan dari suatu kondisi mesin apakah ada kerusakan atau tidak. Kerusakan umum yang biasa terjadi pada pompa dan mesin-mesin berputar adalah *unbalance*, *misalignment*, kerusakan *bearing* dan *mechanical loosenes*. Kerusakan-kerusakan tersebut dapat dideteksi dari kenaikan amplitudo pada frekuensi tertentu. Kerusakan – kerusakan yang sering terjadi pada mesin berputar yaitu :

2.6.1 Unbalance

Unbalance adalah kondisi dimana pusat massa tidak sesumbu dengan sumbu rotasi sehingga rotor mengalami gaya getar berlebih terhadap *bearing* yang menghasilkan gaya sentrifugal. Ada beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya *unbalance* yakni: kesalahan saat proses pemesinan dan *assembly*, eksentrisitas komponen, adanya kotoran saat pengecoran, korosi dan keausan, distorsi geometri karena beban termal dan beban mekanik serta penumpukan material. (Paresh, 2004)

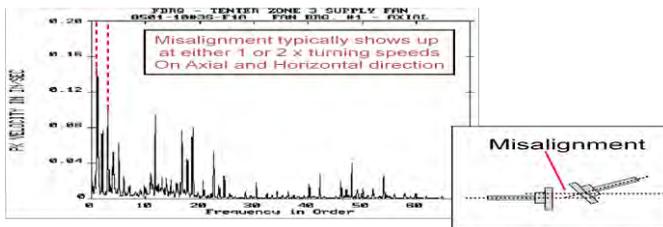


Gambar 2.7 Spektrum Vibrasi *Unbalance* (Tri P.,2011)

Karakteristik dari *unbalance* ini dapat diketahui dengan adanya amplitudo yang tinggi pada 1 x RPM. Tetapi adanya penyimpangan frekuensi pada 1x RPM tidak selalu *Unbalance* , tanda lainnya adalah rasio amplitudo antara pengukuran arah horizontal dan vertikal kecil. Ketika pada kondisi dominan *unbalance* , maka getaran radial (Horizontal dan Vertikal) akan secara normal jauh lebih tinggi dibandingkan *axial*. Pada pompa normal, getaran horizontal lebih tinggi dari vertikal. Amplitudo di 1x RPM secara normal $\geq 80\%$ dari amplitudo keseluruhan ketika masalah dipastikan *unbalance* . (Tri P.,2011). *Static unbalance* mempunyai satuan units dari berat beban dan jari-jari beban dari sumbu pusat yang umumnya ditulis dengan satuan cgs yaitu gram sentimeter ($g \cdot cm$), SAE/AIAG yaitu kilogram milimeter ($kg \cdot mm$) dan Inggris yaitu *ounce inch* ($oz \cdot in$).

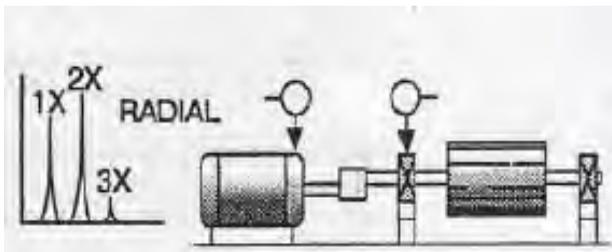
2.6.2 Misalignment

Ketidaklurusan (*misalignment*) terjadi ketika frekuensi *shaft* yang berputar satu kali putaran atau dapat juga terjadi dua dan tiga kali putaran. Normalnya disebabkan adanya getaran yang tinggi pada *axial* dan radial, tetapi tidak selalu tinggi pada *axial* saja. *Misalignment* menghasilkan getaran lebih besar dari keadaan normal di $2x$ RPM dimana dapat terjadi bukan hanya di arah *axial* tapi juga di radial.



Gambar 2.8 Spektrum Vibrasi *Misalignment* (Tri P.,2011)

Jika *misalignment* menjadi semakin buruk hal ini dapat disebabkan besarnya nilai harmonik dimana akan menghasilkan spektrum nampak seperti masalah *looseness*. Untuk *misalignment* parah, pengukuran Radial (horizontal dan vertikal) perbedaan *fasa* terdapat pada 0° atau $180^\circ (\pm 30^\circ)$ antara sisi dalam dan sisi luar *bearing*. Kebanyakan dari waktu, perbedaan *fasa* horizontal mendekati 180° pergeseran *fasa* dibandingkan dengan perbedaan *fasa* vertikal. (Tri P.,2011).



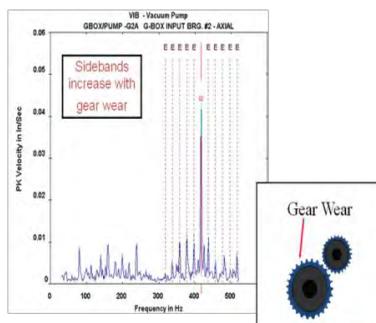
Gambar 2.9 Parallel *Misalignment*(Tri P.,2011)

Salah satu kerusakan *misalignment* yang terjadi pada mesin berputar yaitu parallel *misalignment*. *Shaft* pada parallel *misalignment* terlihat *Offset*. *Misalignment* ini mempunyai kesamaan gejala pada getaran *Angular*, tetapi menunjukkan tingginya getaran radial dimana mencapai *fasa* 180° bersebrangan dengan kopling, amplitudo di 2x RPM lebih besar daripada di 1x. Amplitudo tidak selalu berada pada 1x, 2x, atau 3x yang lebih dominan, tetapi ketinggian *relative* di 1x dimana selalu diindikasikan pada tipe kopling dan konstruksi.

Ketika kedua arah *angular* dan arah radial menjadi semakin tinggi, keduanya dapat menciptakan tingginya *peak* amplitudo jauh lebih tinggi dari harmoninya (4x - 8x) atau ketika rangkaian frekuensi *harmonik* tinggi serupa dengan *mechanical looseness*. Tipe kopling dan material akan membawa pengaruh yang besar pada spektrum ketika gejala *misalignment* ada, hal ini tidak ada pengaruh pada peningkatan suara gaduh. (Tri P.,2011).

2.6.3 Kerusakan Bearing (Bearing Fault)

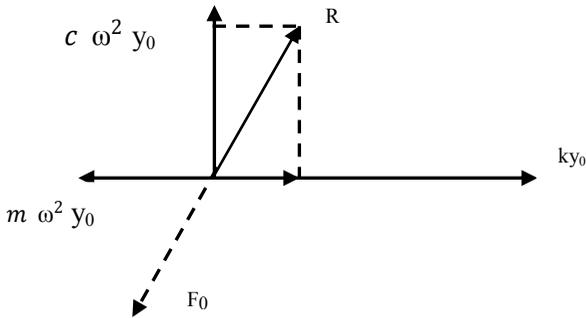
Kerusakan *bearing* (*Bearing Fault*) mempunyai ciri yaitu mempunyai puncak (*peak*) tinggi beberapa kali RPM, 1x, 2x, 3x, 4x, ...10x. Vibrasi akan timbul jika *bearing* sudah parah. Pada spektrum akan tampak *impact* (tubrukan) beberapa frekuensi dengan amplitudo tinggi seperti ditunjukkan gambar 2.15. (Tri P.,2011).



Gambar 2.10 Spektrum Vibrasi Kerusakan *Bearing* (Tri P.,2011)

2.7 Konsep *Transmissibility*

Transmissibility factor adalah rasio antara besarnya gaya dinamis dari mesin yang disalurkan ke bangunan bawah dengan gaya dinamis dari mesin. Besarnya gaya yang disalurkan ke penopang mesin merupakan penjumlahan gaya yang melalui redaman, getaran pada pondasi mesin merupakan *forced vibration* atau getaran dengangaya eksternal yang bekerja pada sistem.



Gambar 2.11 Diagram Vektor dari Gaya Massa (F_0), Pegas (k) dan Redaman (c)

Dari diagram pada gambar 2.11 hubungan antara vektor dari gaya massa (F_0), pegas (k) dan redaman (c) dapat di rumuskan sebagai berikut:

$$F_0 = \sqrt{(cy_0 \omega)^2 + (ky_0 - my_0 \omega^2)^2}$$

atau dalam bentuk lain dapat ditulis

$$F_0 = ky_0 \sqrt{1 - \left(\frac{m \omega^2}{k}\right)^2 + \left(\frac{c \omega}{k}\right)^2} \quad 2.18$$

Karena vektor dari gaya yang melalui pegas dan redaman saling tegak lurus, dengan mengetahui gaya yang melalui pegas ($k \cdot y_0$) dan gaya melalui redaman : $c \cdot \omega \cdot y_0$ maka F_T dirumuskan dengan :

$$F_T = \sqrt{(ky_0)^2 + (c\omega y_0)^2}$$

atau

$$F_T = ky_0 \sqrt{1 + \left(\frac{c \omega}{k}\right)^2} \quad 2.19$$

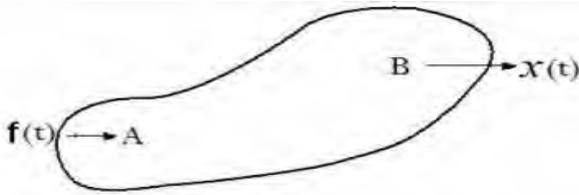
sehingga persamaan *transmissibility* adalah:

$$Tr = \frac{F_T}{F_0} = \frac{k y_0 \sqrt{1 + \left(\frac{c \omega}{k}\right)^2}}{k y_0 \sqrt{\left(1 - \left(\frac{m \omega}{k}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{c \omega}{k}\right)^2}}$$

atau disederhanakan kembali menjadi :

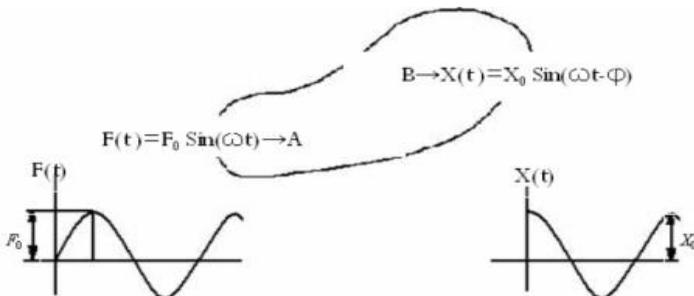
$$Tr = \frac{F_T}{F_0} = \sqrt{\frac{k^2 + (\omega c)^2}{(k - m\omega^2)^2 + (\omega c)^2}} \quad 2.20$$

Tetapi konsep tersebut digunakan pada pondasi sebagai penyalur getaran. Sehingga untuk mengetahui transmisi getaran harus diketahui konstanta pegas (k) dan konstanta redaman (c). Sebagai contoh, terdapat satu sumber getaran dalam satu pondasi di ilustrasikan pada gambar 2.12



Gambar 2.12 *Transmissibility* dengan Sumber Getaran pada Titik A dan Penerima Getaran pada Titik B (AmirHossein, 2013)

Dari gambar 2.12 titik A adalah sumber getaran dan titik B adalah titik penerima getaran. Diasumsikan pada titik A merupakan fungsi dari sinusoidal, maka respon dari fungsi sinusoidal adalah pada titik B. Dimana rasio gaya yang diterima pada titik B adalah $\frac{X_0}{F_0}$. Jika frekuensi eksitasi pada titik A yang mana frekuensi sudut (ω) terjadi perubahan, maka rasio dari $\frac{X_0}{F_0}$ juga akan berubah, diilustrasikan pada gambar 2.13

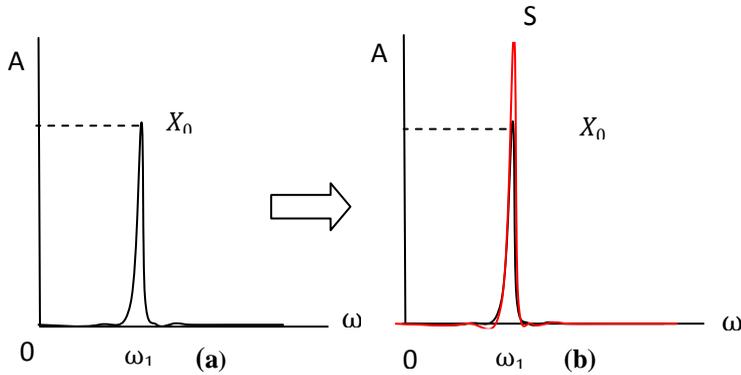


Gambar 2.13 *Respons Transmissibility* dengan Perbedaan Fasa (AmirHossein, 2013)

Ilustrasi pada gambar 2.12 merupakan konsep dasar *transmissibility* dimana pada titik B merupakan titik pengukuran

transmissibility, rasio yang digunakan adalah gaya yang diterima dibanding dengan gaya sumber. Tetapi nilai transmissibility akan sulit dicari ketika pada titik penerima (titik B) juga menghasilkan getaran dengan frekuensi yang sama dengan titik A. Sehingga getaran dari titik A dianggap sebagai pengganggu karena akan mempengaruhi amplitudo.

Berdasar teori *signal processing* dalam buku sinyal dan sistem (oppenheim, alan v. jilid 1. p-295), transformasi *fourier* memetakan konvolusi dari dua sinyal kedalam hasil kali dari transformasi *fourier*. Transformasi *fourier* dari tanggapan impuls merupakan tanggapan frekuensi dan menangkap perubahan amplitudo kompleks dari transformasi *fourier* dengan masukan pada masing-masing frekuensi ω . Sebagai contoh terdapat dua *signal* yang memiliki amplitudo yang berbeda dan frekuensi sudut ω kedua *signal* sama, maka ketika kedua sinyal dikonvolusikan yang mengalami perubahan adalah amplitudo sinyal. Misalkan dari gambar 2.12 jika kedua titik adalah sumber getar maka salah satu dari titik adalah titik tinjauan dan titik lainnya adalah pengganggu, sinyal pada titik A memiliki amplitudo sebesar F_0 dengan frekuensi sudut ω_1 dan sinyal pada titik B memiliki amplitudo sebesar X_0 dan frekuensi ω_1 dimana titik B adalah titik tinjauan maka perubahan sinyal B akibat eksitasi sinyal A perubahan sinyal B akibat eksitasi sinyal A adalah superposisi konstruktif sehingga mengakibatkan kenaikan amplitudo sebesar S pada frekuensi ω_1 diilustrasikan pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Perubahan Amplitudo Sinyal Sebelum Tereksitasi Getaran (a) Sinyal Setelah Tereksitasi Getaran (b)

Persamaan 2.21 adalah konvolusi dari sinyal A dan B, untuk mengetahui perubahan amplitudo sinyal dapat dilihat dengan mengubah sinyal dalam domain waktu kedalam domain frekuensi.

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f(t) \cdot x(t) \quad (2.21)$$

$$y(t) = f(t) * x(t) \xrightarrow{\mathcal{F}} \mathcal{F}\{y(t)\} = \mathcal{F}\{f(t) \cdot x(t)\}$$

atau jika di tulis dalam domain frekuensi persamaan tersebut menjadi:

$$S Y(\omega) = F_0 F(\omega) * X_0 X(\omega) \quad (2.22)$$

pada persamaan 2.22 S, F_0 dan X_0 adalan koefisien masing-masing sinyal, sehingga menurut teori Lemma jika $F(\omega)$ dan $X(\omega)$ berkolokasi maka

$$|S Y'(\omega)| = |F_0 F(\omega)| + |X_0 X(\omega)|$$

Dimana S , F_0 dan X_0 merupakan elemen bilangan *real* dan vektor skalar, maka untuk mengetahui nilai transmisi sinyal A pada titik B yaitu dengan menghitung selisih amplitudo sinyal tercampur (S) dengan amplitudo sinyal sebelum tercampur/baseline (X_0) atau dapat digunakan logaritmik sehingga persamaan *transmissibility* adalah:

$$Transmissibility = 10 \log_{10} \frac{S}{F_0} \text{ dB}$$

atau jika dituliskan kembali persamaan *transmissibility* getaran menjadi :

$$Transmissibility = 10 \log_{10} \frac{S}{B} \text{ dB} \quad (2.23)$$

dengan keterangan :

S : Getaran yang Tercampur Getaran Lain (m/s^2)

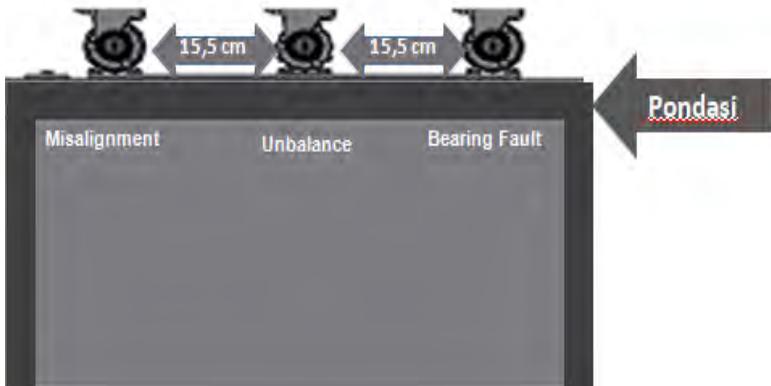
B: *Baseline* Getaran (m/s^2).

Halaman ini memang dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Obyek Penelitian

Obyek yang digunakan adalah *mini plant* pompa di dalam ruang kedap yang berada laboratorium akustik dan fisika bangunan Teknik Fisika ITS. Pada penelitian ini akan digunakan enam pompa dengan satu pompa normal dan lima pompa yang mempunyai kerusakan berbeda. Keenam pompa yang digunakan mempunyai ukuran dan spesifikasi yang sama dengan kecepatan putar pompa 3000 RPM dan frekuensi pompa 50 Hz. Kerusakan yang dibuat adalah *unbalance*, *bearing fault* dan *misalignment*. Jarak antar pompa dalam satu pondasi adalah 15.5 cm, mengikuti penelitian sebelumnya. Pada gambar 3.1 dibawah ini merupakan gambar *mini plant*.

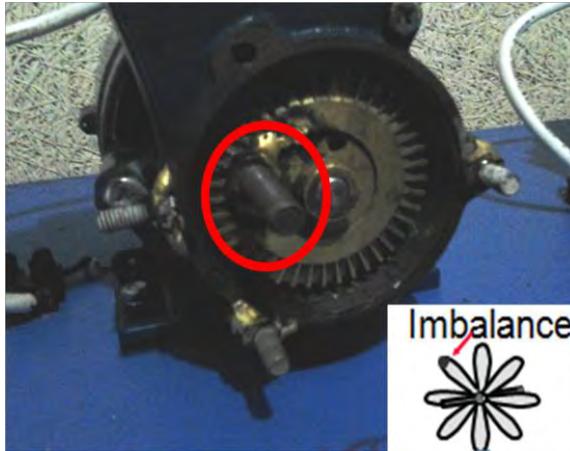


Gambar 3.1 Sketsa *Miniplant*

3.1.1 Pompa *Unbalance*

Kerusakan *unbalance* yang dibuat pada pompa yaitu dengan cara menambah beban pada *impeller* pompa dengan cara di las. Impeller pompa mempunyai diameter 6 cm, beban di letakkan (dilas) pada jarak 1,5 cm dari pusat massa. Terdapat dua pompa dengan kerusakan *unbalance*, pompa dengan beban massa 18 gram dan beban massa 4 gram. Penulisan satuan untuk *unbalance*

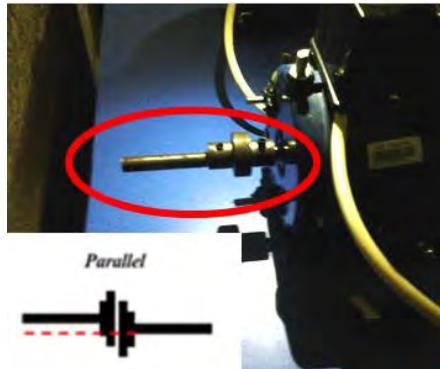
adalah gram.cm yang mana satuan tersebut menunjukkan massa beban dan jarak beban dari sumbu pusat. Sehingga untuk massa beban 4 gram dengan jarak 1.5 cm dari sumbu pusat adalah 6 gram.cm dan untuk massa 8 gram jarak 1.5 cm adalah 27 gram.cm.



Gambar 3.2 *Impeller* dengan Penambahan Massa 18 Gram pada jarak 1.5 cm dari Sumbu Pusat

3.1.2 Pompa *Misalignment*

Jenis kerusakan *misalignment* yang dibuat yaitu paralel *misalignment*. Kerusakan ini dibuat dengan menyambungkan *shaft* pompa bagian belakang dengan besi menggunakan koping. Besi yang disambungkan ke poros pompa berdiameter 1 cm dan panjang 7 cm disesuaikan dengan *shaft* pompa. Koping penyambung dibuat tidak sejajar atau *offset* dengan *shaft* sambungan. Pada rancang bangun ini variasi koping yang dibuat ada tiga macam yaitu koping dengan *offset* 1 mm, 2 mm dan 3 mm dari sumbu pusat.



Gambar 3.3 *Shaft* yang Disambung dengan Besi menggunakan Kopling

3.1.3 Pompa *Bearing Fault*

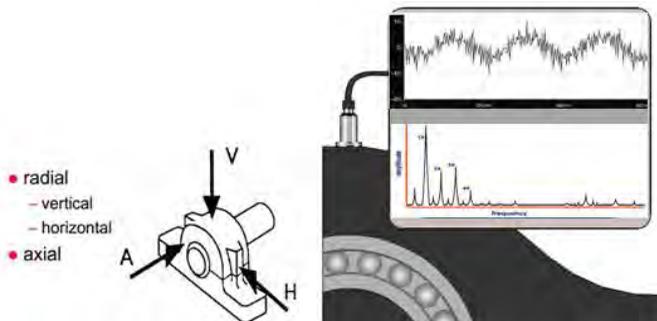
Kerusakan *bearing/Bearing Fault* dibuat dengan memukul *bearing* pada *outer ring* menggunakan palu.



Gambar 3.4 Perusakan *Bearing*

3.2 Teknik Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan pada keenam mesin dengan berbagai kondisi kerusakan. Perangkat pengukuran yang digunakan antara lain *accelerometer*, NI DAQ dan laptop yang terinstal *software NI acoustic and vibration assistant*. Pada sistem pengukuran ini dapat *accelerometer* diletakkan secara *array* pada titik-titik pengukuran (vertical, horizontal dan axial) secara bersamaan sehingga didapatkan informasi getaran dari tiap titik dalam satu waktu. Peletakan sensor arah vertical dan horizontal diletakkan dengan jarak 90^0 sedangkan untuk axial di letakkan sejajar dengan posisi poros.



Gambar 3.5 Ilustrasi Sistem Pengukuran Getaran Pompa

3.3 Pengambilan Data Getaran

Terdapat enam variasi pengukuran getaran yang harus dilakukan untuk melihat pengaruh *transmissibility* pada diagnosa mesin. Pengukuran getaran menggunakan konfigurasi berdasarkan variasi jarak dan kerusakan pompa.

3.3.1 Pengukuran *Baseline*

Perekaman sinyal *baseline* bertujuan sebagai pembanding pengukuran pompa lain yang telah di beri variasi. Pengukuran *baseline* dilakukan pada satu pompa dengan satu jenis kerusakan.

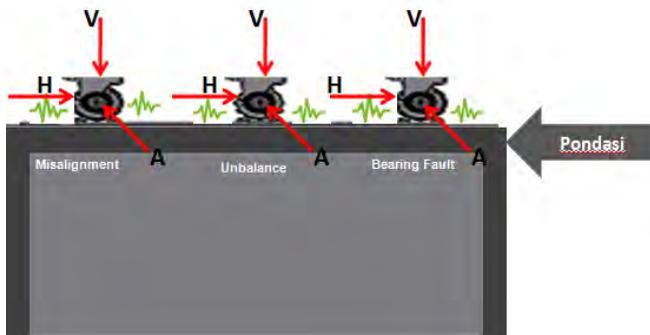
Berikut merupakan tabel pengukuran getaran satu pompa dengan satu kerusakan.

Tabel 3.1 Pengukuran Getaran *Baseline* Satu Pompa Masing-Masing Satu Kerusakan

No	Keadaan Pompa
1	Normal
2	Unbalance 6 gram.cm
3	<i>Unbalance 27 gram.cm</i>
4	<i>Bearing Fault</i>
5	<i>Misalignment 1 mm</i>
6	<i>Misalignment 2 mm</i>
7	<i>Misalignment 3 mm</i>

3.3.2 Pengukuran Getaran Pompa dengan Variasi Kerusakan dan Jumlah Pompa

Setelah melakukan pengambilan data *baseline* kemudian dilakukan pengambilan data getaran pompa dengan variasi kerusakan dan jumlah pompa. Gambar 3.5 merupakan ilustrasi pengukuran getaran tiga pompa dalam satu pondasi. pengukuran dilakukan pada sumbu vertikal, horizontal dan axial



Gambar 3.6 Ilustrasi Pengambilan Data Getaran

Tabel 3.2 sampai tabel 3.5 adalah konfigurasi pengambilan data getaran dengan variasi kerusakan dan jumlah pompa.

Tabel 3.2 Pengukuran Getaran Satu Pompa dengan Dua Kerusakan

No	Jenis Kerusakan
1	<i>Unbalance</i> 6 gram.cm dan <i>Bearing Fault</i>
2	<i>Unbalance</i> 6 gram.cm dan <i>misalignment</i> 1 mm
3	<i>Bearing Fault</i> dan <i>misalignment</i> 3 mm
4	<i>Unbalance</i> 6 gram.cm dan <i>misalignment</i> 2 mm

Tabel 3.3 Pengukuran Getaran Dua Pompa dengan Satu Kerusakan Masing-Masing Pompa

No	Kerusakan Pompa	
	Pompa 1	Pompa 2
1	<i>Unbalance</i> 27 gram.cm	<i>Misalignment</i> 1 mm
2	<i>Unbalance</i> 27 gram.cm	<i>Misalignment</i> 2 mm
3	<i>Unbalance</i> 27 gram.cm	<i>Misalignment</i> 3 mm
4	<i>Unbalance</i> 27 gram.cm	<i>Bearing Fault</i>
5	<i>Bearing Fault</i>	<i>Misalignment</i> 1 mm
6	<i>Bearing Fault</i>	<i>Misalignment</i> 2 mm
7	<i>Bearing Fault</i>	<i>Misalignment</i> 3 mm

Tabel 3.4 Pengukuran Getaran Tiga Pompa dengan Satu Kerusakan per Pompa Masing-Masing Pompa

No	Kerusakan Pompa		
	Pompa 1	Pompa 2	Pompa 3
1	Mis- 3 mm	Unb 27 gram.cm	<i>Bearing F</i>
2	Mis- 3 mm	<i>Bearing F</i>	Unb 27 gram.cm
3	<i>Bearing F</i>	Mis 3mm	Unb 27 gram.cm

Tabel 3.5 Pengukuran Getaran dua Pompa dengan Dua Kerusakan Masing-Masing Pompa

No	Jenis Kerusakan	
	Pompa 1	Pompa 2
1	<i>Unb 6 gram.cm dan Bearing Fault</i>	<i>Unb 27 gram.cm dan misalignment 1 mm</i>
2	<i>Unb 6 gram.cm dan Bearing Fault</i>	<i>Bearing Fault dan misalignment 3 mm</i>
3	<i>Unb 6 gram.cm dan Bearing Fault</i>	<i>Unb 6 gram.cm dan misalignment 2 mm</i>
4	<i>Unb 27 gram.cm dan misalignment 1 mm</i>	<i>Bearing Fault dan misalignment 3 mm</i>
5	<i>Unb 27 gram.cm dan misalignment 1 mm</i>	<i>Unb 6 gram.cm dan misalignment 2 mm</i>
6	<i>Bearing Fault dan misalignment 3 mm</i>	<i>Unb 6 gram.cm dan misalignment 2 mm</i>

Keterangan untuk tabel 3.4 dan tabel 3.5 :

Unb : *Unbalance*

Bearing F : *Bearing fault*

Mis : *Misalignment*

Tabel 3.6 Pengukuran Getaran dua Pompa dengan Tiga Kerusakan

No	Kerusakan Pompa	
	Pompa 1	Pompa 2
1	<i>Misalignment 3 mm dan Bearing Fault</i>	<i>Unbalance 27 gram.cm</i>
2	<i>Unbalance 27 gram.cm dan Misalignment 3 mm</i>	<i>Bearing Fault</i>

3.4 Pengolahan Data

Pengambilan data getaran menghasilkan data berupa nilai percepatan tiap satuan waktu yang tersimpan dalam bentuk lvm (data hasil pengolahan pada *labview*). Setelah itu menghitung nilai rata-rata amplitudo percepatan pada setiap pengukuran getaran pompa untuk mengetahui arah getaran dominan dari masing-masing kerusakan. Sedangkan untuk mengetahui nilai *transmissibility* maka dilakukan perhitungan untuk mengetahui *transmissibility* antar pompa dengan persamaan sebagai berikut :

$$Transmissibility = 10 \log_{10} \frac{S}{B} \text{ dB} \quad (3.1)$$

dengan keterangan :

S : Getaran yang Tercampur Getaran Lain (m/s^2)

B: *Baseline* Getaran (m/s^2).

Untuk membuktikan adanya *transmissibility* maka ditunjukkan dengan spektrum FFT (*Fast Fourier Transform*) hasil pengolahan menggunakan *labview*

BAB IV PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas hasil deteksi kerusakan pompa melalui pengukuran getaran pompa yang dipengaruhi transmissibilitas getaran pompa lain dalam satu pondasi. Terdapat hipotesa yang dibuktikan untuk menjawab tujuan penelitian bahwa *transmissibility* dapat dideteksi menggunakan *accelerometer array*. Untuk dapat mencapai tujuan tersebut maka dilakukan enam eksperimen pengukuran getaran dengan variasi kerusakan mesin dan jumlah pompa. Sehingga dari data getaran dapat dihitung nilai *transmissibility* pompa dan dibuktikan bahwa *transmissibility* mempengaruhi deteksi kerusakan dengan *spectrum FFT (fast fourier transform)* yang menunjukkan kenaikan/penurunan amplitudo pada frekuensi kerusakan pompa.

4.1 Pengukuran *Baseline*

Pengukuran *baseline* dilakukan pada keenam pompa dengan masing-masing kerusakan yaitu *unbalance* 6 gram.cm, *unbalance* 27 gram.cm, *bearing fault*, *misalignment* 1 mm, *misalignment* 2 mm dan *misalignment* 3 mm. Dari hasil pengukuran, dihitung rata-rata nilai percepatan tiap sumbu pengukuran dan ditampilkan dalam bentuk tabel. Tabel 4.1 menunjukkan nilai rata-rata dari setiap kerusakan pompa di masing-masing sumbu pengukuran. Dimana sumbu pengukuran dengan getaran dominan akan menjadi acuan untuk pengukuran dengan berbagai variasi.

Pada tabel 4.1 merupakan nilai rata-rata amplitudo tinggi pada masing-masing sumbu ditampilkan. Terdapat tiga macam kerusakan *baseline* yang digunakan yaitu *unbalance*, *bearing fault* dan *misalignment*. Ketiga kerusakan tersebut mempunyai ciri-ciri yang dilihat melalui analisis getaran dalam domain frekuensi yang ditampilkan dalam bentuk spektrum.

Tabel 4.1 Rata-Rata Percepatan Getaran pada Masing-Masing Kerusakan Pompa

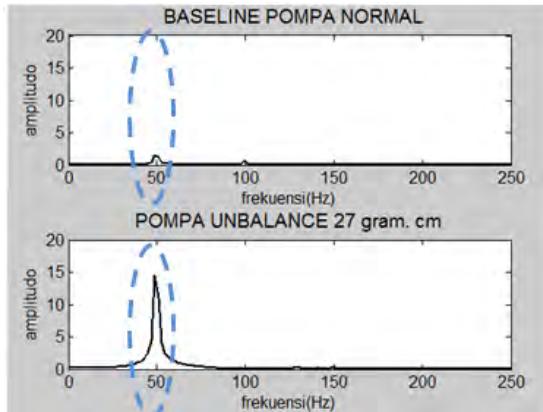
No	Kerusakan Pompa	Rata-Rata Percepatan Getaran (m/s ²)		
		Vertikal	Horizontal	Axial
1	Normal	1.9847	1.2964	1.1252
2	Unb 6 gram.cm	2.4109	1.3499	2.0307
3	Unb 27 gram.cm	12.5919	3.0367	6.3154
4	<i>Bearing fault</i>	5.3878	4.3244	5.3209
5	Mis 1mm	1.6535	2.2436	2.4644
6	Mis 2mm	8.4495	8.9356	2.1692
7	Mis 3mm	9.3022	8.7367	2.2456

Dari tabel 4.1 didapatkan sumbu tinjauan setiap kerusakan yang merupakan acuan untuk analisis getaran selanjutnya, Berikut keterangan sumbu tinjauan pada masing-masing kerusakan yaitu :

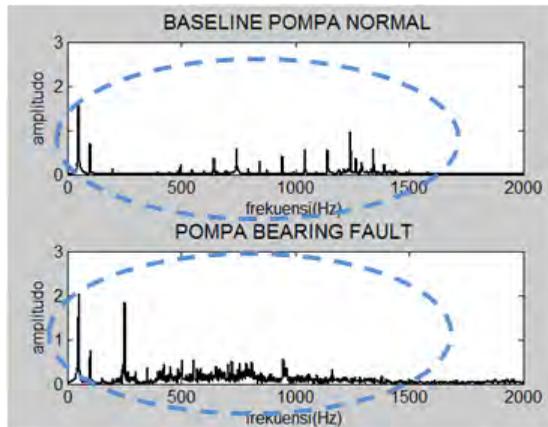
Tabel 4.2 Sumbu Tinjauan pada Masing-Masing Kerusakan Pompa

No	Jenis Kerusakan	Sumbu Tinjauan
1	<i>Unbalance 6 gram.cm</i>	Vertikal
2	<i>Unbalance 27 gram.cm</i>	Vertikal
3	<i>Bearing fault</i>	Vertikal
4	<i>Misalignment 1 mm</i>	Axial
5	<i>Misalignment 2 mm</i>	Horizontal
6	<i>Misalignment 3 mm</i>	Vertikal

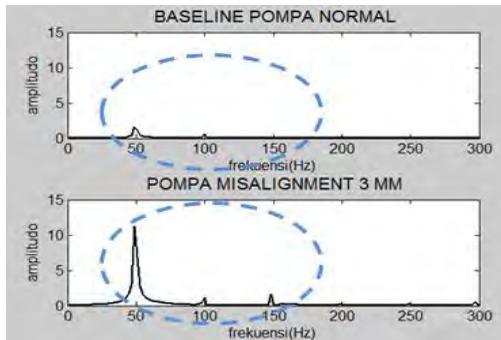
Pada gambar 4.1 sampai 4.3 menunjukkan perbandingan keadaan normal pompa dengan pompa yang diberi kerusakan dilihat berdasar kenaikan amplitudo (yang dilingkari). Spektrum yang ditampilkan merupakan sumbu getaran dengan nilai paling tinggi pada setiap kerusakan. Hasil spektrum kemudian dianalisis dan disesuaikan dengan teori yang menyatakan bahwa setiap kerusakan mempunyai kenaikan amplitudo di daerah frekuensi tertentu dari kondisi normal.



Gambar 4.1 Kenaikan Amplitudo pada Frekuensi 50 Hz Sumbu Vertikal dari Keadaan Normal (atas) menjadi *Unbalance* (bawah)



Gambar 4.2 Kenaikan dan perubahan pola Amplitudo pada daerah frekuensi *bearing* 50 Hz sampai 1500 Hz dari Keadaan Normal (atas) menjadi *Bearing fault* (bawah)



Gambar 4.3 Kenaikan Amplitudo pada Frekuensi 50 Hz, 100 Hz dan 150 Hz dari Keadaan Normal (atas) menjadi *Misalignment* 3 mm (bawah)

Dari pengukuran pompa *unbalance* 27 gram.cm, hasil pengolahan FFT menunjukkan bahwa terdapat kenaikan amplitudo disatu kali frekuensi yaitu 50 Hz yang dominan pada sumbu vertikal (gambar 4.1). Gaya getaran pengaruh dari penambahan beban di *impeller* mengakibatkan getaran cenderung bergerak vertikal (naik turun). Hal ini sesuai dengan teori yang disampaikan Paresh Girdhar (2004, P- 90;91) dalam bukunya *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance* yang menyebutkan bahwa ketidak seimbangan distribusi dari massa saat rotor berputar pada sumbunya. *Unbalance* statik akan berada pada fasa 15^0-20^0 . Jika beban dipindah dari arah vertikal ke arah horizontal, maka fasa akan bergeser $90^0 (\pm 30^0)$. Dalam hal ini kenaikan amplitudo tersebut diakibatkan karena saat shaft berputar pada sumbunya, *impeller* berputar tidak tepat pada titik sumbu karena adanya beban tambahan. Ciri-ciri pada pompa *unbalance* 27 gram.cm sama dengan pompa *unbalance* 6 gram.cm, hanya pompa *unbalance* 27 gram.cm mempunyai amplitudo yang lebih besar dibanding dengan pompa 6 gram.cm (lihat gambar spectrum pada CD TA).

Dari pengukuran pompa *bearing fault* terlihat adanya kenaikan dan perubahan pola amplitudo di daerah frekuensi *bearing fault* yaitu 50 Hz sampai 1500 Hz pada sumbu horizontal

(lihat gambar 4.4). Kerusakan *bearing fault* memiliki amplitudo yang lebih rendah dari kerusakan *unbalance* maupun *misalignment*, karena getaran berasal dari gesekan pada bagian *bearing* misalkan karena aus. Jika mengacu pada teori yang disampaikan Paresh Girdhar (2004, P- 112; 115) dalam bukunya *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance* yang menyebutkan bahwa, hasil pengukuran *bearing fault* yang menunjukkan kenaikan amplitudo pada frekuensi rendah yaitu sampai 1X rpm menunjukkan tingkat kerusakan yang serius, *bearing* dalam kondisi kerusakan yang sangat parah. Hal itu mungkin disebabkan meningkatnya kecepatan harmonik, dapat juga disebabkan karena menjauhnya jarak dalam *bearing* yang membuat perpindahan rotor semakin jauh pula.

Pada pengukuran pompa *misalignment* menunjukkan adanya kenaikan amplitudo di 1x, 2x dan 3x frekuensi tetapi kenaikan amplitudo tertinggi di 1x yaitu 50 Hz daripada 2X dan 3X rpm. Sehingga sekilas ciri-ciri ini mirip dengan kerusakan *unbalance*. Hal ini dapat dikarenakan sambungan shaft pada pompa yang tidak mempunyai tumpuan, sehingga ketika mesin berputar gaya pada sambungan shaft tertumpu pada ujung shaft. Kenaikan amplitudo pada 1x rpm menunjukan vibrasi radial yang tinggi hingga mendekati perbedaan fasa 180° melintang dengan kopling. ciri -ciri ini berbeda dengan kerusakan *unbalance*, karena perbedaan fasa pada *unbalance* adalah 90° (Paresh Girdhar. 2004. P-95).

Pada kerusakan *misalignment* 1 mm dan 2 mm memiliki amplitudo tertinggi berada pada sumbu yang berbeda, *misalignment* 1 mm memiliki amplitudo tertinggi pada sumbu axial sedangkan *misalignment* 2 mm memiliki amplitudo yang tinggi pada sumbu horizontal. Tetapi nilai amplitudo dari kerusakan *misalignment* yang ditampilkan pada tabel 4.1 menunjukkan kenaikan berdasar ketidaklurusan antara dua shaft. Sambungan shaft pada pompa yang tidak mempunyai tumpuan menyebabkan gaya getaran tertumpu pada ujung shaft. Semakin besar jarak ketidaklurusan yang dibuat maka arah getaran juga

berubah dari jarak 1 mm dengan arah getaran axial ketika jarak ketidaklurusan ditambah menjadi 2 mm arah getaran menjadi horizontal dan pada jarak ketidaklurusan 3 mm getaran cenderung bergerak vertikal (naik turun) sehingga menyerupai *unbalance*.

4.2 Deteksi Kerusakan Pompa dengan Variasi Kerusakan dan Jumlah Pompa

Untuk melihat apakah dari hasil pengukuran getaran banyak pompa dalam satu pondasi dapat mempengaruhi diagnosa kerusakan karena *transmissibility*, maka pada penelitian ini dilakukan analisis spektrum pada sumbu pengukuran. Yang mana berdasar tabel 4.2 telah dipilih sumbu tinjauan dari masing - masing kerusakan pompa. Sedangkan untuk mengetahui apakah *transmissibility* juga mempengaruhi getaran pada selain tinjauan maka dilakukan analisis spektrum FFT pada sumbu selain sumbu pengukuran.

4.2.1 Deteksi Kerusakan Pompa pada Sumbu Tinjauan

Dalam mendeteksi multi kerusakan pompa dengan variasi jumlah pompa digunakan sumbu tinjauan sebagai acuan pemilihan data yang akan dianalisis. Sedangkan untuk menganalisis kerusakan pompa yang dipengaruhi transmissibilitas getaran pompa lain dalam satu pondasi, maka diperlukan perhitungan nilai *transmissibility* getaran. Nilai *transmissibility* yang didapatkan kemudian di tampilkan pada tabel. Sebagai contoh nilai *transmissibility* getaran yang ditampilkan adalah dari pengukuran pada dua pompa dengan masing-masing pompa memiliki satu kerusakan.

Pada tabel 4.3 menunjukkan nilai transmissibility getaran dua pompa dalam satu pondasi. Nilai *transmissibility* getaran pada sumbu tinjauan masing-masing kerusakan sebagian besar menunjukkan angka yang kecil (mendekati nol), yang menunjukkan bahwa perbandingan nilai getaran tercampur dengan nilai getaran *baseline* tidak terlampaui jauh yang berarti pompa target menerima energi getaran yang kecil dari pompa pengganggu. Dari hasil perhitungan juga menunjukkan bahwa

terjadi adanya *transmissibility* antar pompa dengan nilai *transmissibility* yang besar (nilai yang jauh dari nilai nol) berada pada sumbu selain sumbu tinjauan. Nilai *Transmissibility* juga menunjukkan bahwa *transmissibility* getaran dengan nilai dominan (paling positif/paling negatif) yang terjadi pada sumbu tinjauan, cenderung mempengaruhi deteksi kerusakan pompa.

Tabel 4.3 Perhitungan *Transmissibility* dari Pengukuran Dua Pompa dengan Masing-Masing Pompa Memiliki Satu Kerusakan

No	PERHITUNGAN <i>TRANSMISSIBILITY</i> (dB)							
	POMPA 1	SUMBU PENGUKURAN			POMPA 2	SUMBU PENGUKURAN		
		V	H	A		V	H	A
1	Unb 27 gram.cm	-0.354	-0.558	-0.731	Mis - 1 mm	10.378	-2.798	1.705
2	Unb 27 gram.cm	1.244	-0.548	-1.180	Mis - 2 mm	1.764	-7.729	2.841
3	Unb 27 gram.cm	0.023	3.590	-0.759	Mis - 3 mm	1.567	1.888	2.499
4	Unb 27 gram.cm	-0.036	-0.908	-1.249	Bearing F	3.672	0.385	4.265
5	Bearing F	0.006	0.068	5.456	Mis - 1 mm	5.025	-2.347	-2.879
6	Bearing F	0.541	0.501	5.720	Mis - 2 mm	-0.129	-8.037	4.489
7	Bearing F	0.368	0.644	5.079	Mis - 3 mm	-0.391	-7.059	4.606

Keterangan :

Unb : *Unbalance*

Bearing F : *Bearing fault*

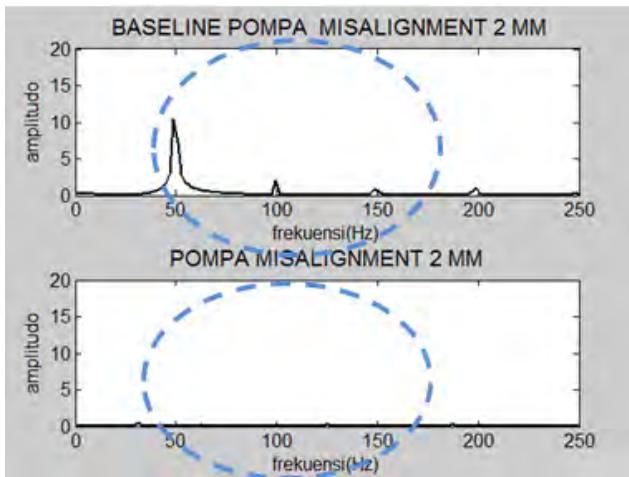
Mis : *Misalignment*

V : Vertikal

h : Horizontal

A : Axial

Terdapat beberapa nilai *transmissibility* pada sumbu tinjauan yang menunjukkan nilai yang positif tertinggi, menunjukkan bahwa terjadi superposisi *konstruktif* pada frekuensi kerusakan. Sedangkan nilai *transmissibility* paling negatif menunjukkan superposisi *destruktif* pada frekuensi kerusakan. Sehingga untuk mengetahui pengaruh *transmissibility* pada deteksi kerusakan pompa, dibuktikan dengan spektrum FFT. Sebagai contoh perubahan deteksi pada pompa *misalignment* 2 mm yang dioperasikan dengan *unbalance* 27 gram.cm (pengukuran ke-2 pompa 2) yang ditampilkan pada gambar 4.4.

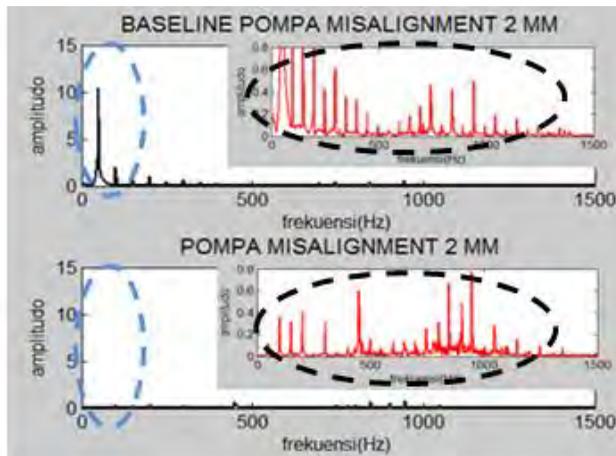


Gambar 4.4 Perbandingan Amplitudo *Baseline Misalignment* 2 mm (atas) dengan Pompa *Misalignment* 2 mm yang dioperasikan dengan Pompa *Unbalance* 27 gram.cm (bawah)

Gambar 4.4 menunjukkan superposisi *destruktif* karena terjadi penurunan amplitudo pada frekuensi 50 Hz, 100 Hz dan 150 Hz. Tetapi penurunan amplitudo terbesar pada frekuensi 50 Hz yaitu dari *baseline misalignment* 2mm dengan amplitudo sebesar 14 m/s^2 turun menjadi 1 m/s^2 setelah pompa dioperasikan dengan pompa *unbalance* 27 gram.cm. Superposisi tersebut

terjadi karena saat pompa *misalignment* beroperasi, getaran pompa *misalignment* terdistorsi oleh transmisi getaran dari pompa *unbalance*. Dalam hal ini getaran dominan dihasilkan kedua pompa berada pada frekuensi yang sama yaitu 50 Hz tetapi yang menyebabkan saling menghilangkan adalah karena berbeda fasa.

Superposisi *destruktif* juga terjadi pada spektrum pompa *misalignment* 2mm yang dioperasikan dengan *bearing fault* yang ditunjukkan pada gambar 4.5. Dari spektrum terlihat adanya penurunan amplitudo pada frekuensi 50 Hz, tetapi terjadi kenaikan di daerah frekuensi *bearing fault* sehingga pompa *misalignment* mengalami perubahan diagnosa dari kerusakan *misalignment* menjadi *bearing bearing fault*.

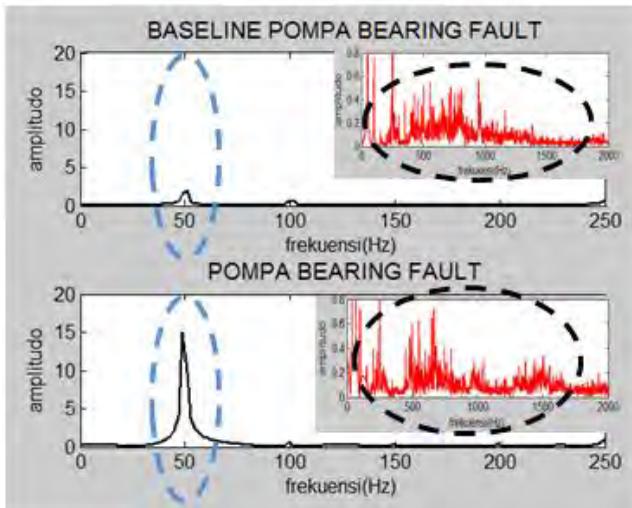


Gambar 4.5 Perbandingan Amplitudo *Baseline Misalignment* 2 mm (atas) dengan *Pompa Misalignment* 2 mm yang dioperasikan dengan *Pompa Bearing fault* (bawah)

Gambar 4.5 pompa *misalignment* 2 mm menunjukkan amplitudo yang tinggi pada frekuensi 50 Hz yang ditunjukkan lingkaran biru pada gambar atas, tetapi ketika dioperasikan dengan pompa *bearing fault*, amplitudo di 50 Hz mengalami penurunan dari 0.8 menjadi 0.2 yang ditunjukkan dengan

lingkaran biru pada gambar bawah. Penurunan amplitudo pada pompa *misalignment* menunjukkan superposisi *destruktif* karena getaran yang dihasilkan kedua pompa mempunyai beda fasa. Deteksi kerusakan pompa berubah ketika amplitudo pada daerah frekuensi *bearing* yaitu antara 100 Hz sampai 1250 Hz terjadi kenaikan yang menunjukkan kerusakan *bearing fault*.

Pada kasus lain nilai *transmissibility* pada sumbu tinjauan dengan nilai positif menunjukkan superposisi konstruktif, sebagai contoh pada pengukuran pompa *bearing fault* yang dioperasikan dengan pompa *unbalance* 27 gram.cm.



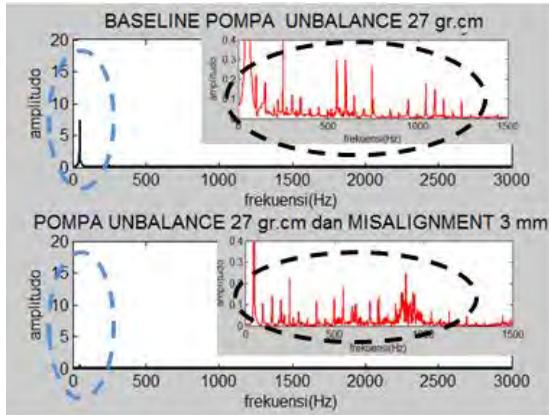
Gambar 4.6 Kenaikan Amplitudo di Frekuensi 50 Hz pada pompa *Bearing fault* yang dioperasikan dengan Pompa *Unbalance* 27 gram.cm

Gambar 4.6 bagian atas adalah spektrum sinyal *baseline bearing fault* yang ditunjukkan dengan amplitudo tinggi pada frekuensi tinggi antara 100 Hz sampai 1000 Hz (gambar diperjelas pada lingkaran hitam). Tetapi ketika pompa *bearing fault* dioperasikan dengan pompa *unbalance* di frekuensi 50 Hz

terjadi kenaikan amplitudo (lingkaran biru). Kenaikan amplitudo di frekuensi 50 Hz kemungkinan akibat getaran yang di transmisikan pompa *unbalance* 27 gram.cm. Kenaikan amplitudo pada pompa *bearing fault* terjadi pada sumbu vertikal dengan nilai amplitudo 15 m/s^2 , jika dibandingkan dengan spektrum *baseline unbalance* 27 gram.cm terlihat kesamaan bahwa arah getaran pompa dengan kerusakan *unbalance* cenderung pada sumbu vertikal dengan amplitudo 15 m/s^2 . Sehingga dapat dipastikan bahwa kenaikan amplitudo di frekuensi 50 Hz pada pompa *bearing fault* sebesar 15 m/s^2 adalah transmisi getaran dari pompa *unbalance*. Meskipun pompa *bearing fault* dioperasikan bersama pompa *unbalance* 27 gram.cm kerusakan *bearing fault* masih tetap terdeteksi karena getaran yang di hasilkan pompa *bearing fault* dan *unbalance* tidak memiliki beda fasa, ditunjukkan pada amplitudo yang di lingkaran merah pada gambar bagian bawah. Sehingga pompa *bearing fault* terdeteksi menjadi pompa dengan kerusakan *bearing fault* dan *unbalance*.

4.2.2 Deteksi Kerusakan Pompa pada Selain Sumbu Tinjauan

Perubahan deteksi kerusakan pompa karena adanya *transmissibility* pompa lain dalam satu pondasi juga dapat dilihat melalui nilai *transmissibility* pada selain sumbu tinjauan. Misalkan pada pengukuran dua pompa dalam satu penopang yang mana satu pompa memiliki dua kerusakan dan pompa lainnya memiliki satu kerusakan. Analisis dilakukan pada pompa dengan kerusakan *unbalance* 27 gram.cm dan misalignmen 3 mm yang dioperasikan dengan pompa *bearing fault* dimana sinyal tersebut dibandingkan dengan *baseline* pompa *unbalance* 27 gram.cm. Dari tabel *transmissibility* perubahan deteksi kerusakan terjadi pada sumbu axial dimana sumbu tersebut bukan merupakan sumbu tinjauan dari kerusakan *unbalance*, perubahan deteksi tersebut dibuktikan dengan hasil FFT yang ditampilkan pada gambar 4.7



Gambar 4.7 Perbandingan spektrum pompa *unbalance* 27 gram.cm (atas) dengan Pompa *unbalance* 27 gram.cm + *Misalignment* 3 mm yang dioperasikan dengan Pompa *Bearing fault* (bawah)

Gambar 4.7 bagian bawah adalah spektrum dari pengukuran pompa dengan dua kerusakan yaitu *unbalance* 27 gram.cm dan *misalignment* 3 mm yang dioperasikan dengan pompa *bearing fault*. Pada spektrum tersebut terlihat bahwa amplitudo pada frekuensi 50 Hz mengalami penurunan amplitudo dari 8 m/s^2 menjadi 0.5 m/s^2 jika di bandingkan dengan spektrum *baseline*. Penurunan amplitudo tersebut terjadi karena kerusakan *unbalance* dan *misalignment* memiliki perbedaan fasa pada getarannya sehingga hasil pengukuran menunjukkan superposisi destruktif. Ketika pompa dioperasikan dengan pompa *bearing fault*, transmisi getaran yang diterima dari pompa *bearing fault* tidak terlalu besar. Tetapi pola kenaikan amplitudo pada frekuensi antara 200 Hz sampai 1500 Hz pada spektrum bawah mengalami perubahan pola terlihat pada amplitudo yang di lingkari hitam. Sehingga pompa dengan kerusakan *unbalance* dan *misalignment* sulit dideteksi karena pada daerah frekuensi kerusakan *unbalance* dan *misalignment* tidak menunjukkan kenaikan amplitudo, sedangkan transmisi getaran dari pompa *bearing fault* dapat dilihat melalui perubahan pola amplitudo pada spektrum FFT.

BAB V

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian didapatkan kesimpulan yaitu *transmissibility* antar pompa dalam satu penopang dapat dideteksi menggunakan *accelerometer array*, dibuktikan dengan adanya perubahan diagnosa kerusakan pompa pada spektrum *Fast Fourier Transform*. Nilai *transmissibility* yang bernilai negatif menunjukkan superposisi *destruktif* misalkan pada pompa *misalignment* 2mm (yang dioperasikan dengan pompa *unbalance* 27 gram.cm) dengan nilai *transmissibility* - 7.7296 dB. Sedangkan *transmissibility* yang bernilai positif menunjukkan superposisi konstruktif misalkan pada pompa *bearing fault* (yang dioperasikan dengan pompa *unbalance* 27 gram. cm) dengan nilai 3.6719 dB.

halaman ini memang dikosongkan

LAMPIRAN A
DATA TEKNIS PENGAMBILAN DATA

Setting DAQ pada Labview	
Signal input range	Max : 440
	Min : -440
Unit Scale	m/s^2
Sensitivitas Unit	mv/g
Fekkuensi Sampling	25.6 kHz
Time Recording	5 s
File Format	Lvm
Selected Measurement	Magnitude (peak)
Result	Linier
Window	Hanning
Spesifikasi Pompa	
Jenis Motor	Induksi; 1 Fasa
Sumber Tegangan	220 V ; 50 Hz
Daya Keluaran	125 Watt
Jumlah Kutub	2
Kecepatan Sudut	30000 RPM

LAMPIRAN B
HASIL PERHITUNGAN TRANSMISSIBILITY

Tabel 1. Pengukuran pada tiga pompa dengan masing-masing pompa satu kerusakan

NO	POMPA 1	V	H	A
1	Mis - 3 m	-0.79687	-5.7414	4.1716
2	Mis -3 mm	-1.9597	-6.1544	5.0624
3	Bearing F	1.5301	3.1717	5.0728
NO	POMPA 2	V	H	A
1	Unb - 18gr	-1.0881	-3.6092	-0.3286
2	Bearing f	0.98585	2.7322	4.4407
3	Mis 3mm	0.10356	-6.2243	1.6942
NO	POMPA 3	V	H	A
1	Bearing f	1.6979	2.717	4.0972
2	Unb 27 gram.cm	-3.719	-0.48748	-1.2191
3	Unb 27 gram.cm	-8.93	-2.1996	-3.6934

Tabel 2. Pengukuran Getaran Satu Pompa dengan Dua Kerusakan

No	Jenis Kerusakan Pompa	Sumbu Pengukuran		
		Vertikal	Horizontal	Axial
1	<i>Unbalance 6 gram.cm</i>	4.4637	6.7306	1.6573
	<i>Bearing Fault</i>	0.9713	1.6744	-2.5261
2	<i>Unbalance 27 gram.cm</i>	0.52213	-1.731	-3.2755
	<i>misalignment 1 mm</i>	9.339	-0.41645	0.81151
3	<i>Bearing Fault</i>	3.0104	-4.9846	-1.1
	<i>misalignment 3 mm</i>	0.63865	-8.0388	2.6465
4	<i>Unbalance 4 g • 1.5 cm</i>	0.74984	-1.3329	2.7717
	<i>misalignment 2 mm</i>	-4.6967	-9.541	2.4852

Tabel 3. Pengukuran Getaran dua Pompa dengan Dua Kerusakan Masing-Masing Pompa

No	Kerusakan Pompa 1 (dua kerusakan)	Sumbu pengukuran			Kerusakan Pompa 2 (dua kerusakan)	Sumbu pengukuran		
		V	H	A		V	H	Axial
1	<i>Unb 6 gram.cm</i>	6.996	5.174	1.932	<i>Unb 27 gram.cm</i>	0.712	-1.399	-3.246
	<i>Bearing Fault</i>	3.504	0.117	-2.251	<i>misalignment 1 mm</i>	9.529	-0.085	0.842
2	<i>Unb 6 gram.cm</i>	1.469	6.906	1.210	<i>Unb 6 gram.cm</i>	1.122	0.850	2.953
	<i>Bearing Fault</i>	-2.023	1.85	-2.973	<i>misalignment 2 mm</i>	-4.324	-7.358	2.667
3	<i>Unb 6 gram.cm</i>	3.523	4.676	1.987	<i>Bearing Fault</i>	2.548	-0.085	2.944
	<i>Bearing Fault</i>	0.031	-0.381	-2.196	<i>misalignment 3 mm</i>	0.1768	-3.139	6.691
4	<i>Bearing Fault</i>	1.129	0.859	2.909	<i>Unb 27 gram.cm</i>	3.9772	-3.3504	-2.2267
	<i>misalignment 3 mm</i>	-1.242	-2.194	6.656	<i>misalignment 1 mm</i>	6.6172	-2.0358	1.8603

Tabel 4. Pengukuran Getaran dua Pompa dengan Satu Pompa Satu Kerusakan dan Pompa Lainnya 2 Kerusakan

No	Kerusakan Pompa 1 (dua kerusakan)	Sumbu pengukuran			Kerusakan Pompa 2 (satu kerusakan)	Sumbu pengukuran		
		V	H	A		V	H	A
1	<i>Misalignment 3 mm</i>	-0.089	-2.472	7.183	<i>Unb 27 gram.cm</i>	-1.747	-3.917	-1.151
	<i>Bearing Fault</i>	2.283	0.582	3.436				
2	<i>Unb27 gram.cm</i>	-1.328	-4.149	-8.543	<i>Bearing Fault</i>	2.190	0.467	5.055
	<i>Misalignment 3 mm</i>	-0.013	-8.738	-4.052				