

# PENGUKURAN FUNGSI RESPON FREKUENSI (FRF) PADA SISTEM POROS-ROTOR

**Erinofiardi**

Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Bengkulu

E-mail : [riyuno.vandi@yahoo.com](mailto:riyuno.vandi@yahoo.com)

## **Abstract**

*Frequency response function (FRF) is a magnitude of comparison between output and input signal in frequency domain. Result of FRF measurement on mechanical system will be investigated in this research. Basically, FRF shows relation between vibration response and excitation force which applied to that mechanical system. Measurement of FRF was done in horizontal and vertical direction on rotor-shaft system, and data in time domain was changed to frequency domain by using Fast Fourier Transform (FFT). This experiment shows that natural frequencies in horizontal direction are lower than in vertical direction. FRF results for horizontal are 33.5 Hz and 122 Hz, meanwhile, measurement of FRF in vertical gives natural frequencies 42.5 Hz and 137 Hz.*

**Keywords :** FRF, shaft-rotor system, natural frequency

## **Pendahuluan**

Fungsi respon frekuensi (FRF) merupakan suatu besaran yang menyatakan perbandingan antara sinyal keluaran dan sinyal masukan dalam domain frekuensi. Dalam makalah ini akan dibahas mengenai hasil pengukuran FRF pada sistem mekanik. Secara fisik, pada sistem mekanik besaran ini menunjukkan hubungan antara respon getaran yang terjadi dan gaya eksitasi yang bekerja pada sistem tersebut. Pada sistem mekanik, FRF menggambarkan kekakuan dinamikanya. Berdasarkan jenis respon getaran yang diukur, FRF dibagi menjadi tiga jenis seperti diperlihatkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Jenis-jenis FRF

Definisi	Respon	Variabel
<i>Receptance / Compliance</i>	$\frac{X}{F}$	$\frac{\text{Simpangan}}{\text{Gaya}}$
<i>Mobility</i>	$\frac{\dot{X}}{F}$	$\frac{\text{Kecepatan}}{\text{Gaya}}$

<i>Inertance</i>	$\frac{\ddot{X}}{F}$	$\frac{\text{Percepatan}}{\text{Gaya}}$
------------------	----------------------	---

Secara matematik, FRF dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$H(f) = \frac{S_{yx}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (1)$$

Keakuratan dan keandalan hasil pengukuran FRF dapat ditentukan dari besarnya fungsi koherensi. Fungsi koherensi merupakan normalisasi dari fungsi korelasi silang dalam domain frekuensi. Secara matematik, fungsi tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\gamma^2 = \frac{|S_{yx}(f)|^2}{S_{xx}(f) \cdot S_{yy}(f)}, \text{ dengan } 0 < \gamma^2 < 1 \quad (2)$$

yang mana:

$\gamma^2$  = fungsi koherensi

$S_{yx}$  = *Cross Spectral Density* (CSD) antara sinyal masukan dan sinyal keluaran

$S_{xx}$  = *Auto Spectral Density* (ASD) dari sinyal masukan

$S_{yy}$  = *Auto Spectral Density* (ASD) dari sinyal keluaran

Arti fisik fungsi koherensi adalah suatu perbandingan antara daya sinyal yang berasal dari sinyal masukan yang sesungguhnya dan daya sinyal keluaran total yang dibaca oleh sensor. Nilai koherensi sama dengan nol berarti bahwa sinyal respon getaran yang diukur bukan disebabkan oleh gaya eksitasi yang diberikan pada sistem, melainkan berasal dari sinyal pengganggu (*noise*). Jadi, pada kondisi ini sinyal keluaran atau respon getaran yang terukur tidak mempunyai hubungan dengan sinyal masukan. Sebaliknya, nilai koherensi sama dengan satu menyatakan bahwa respon getaran yang terukur seluruhnya berasal dari gaya eksitasi yang diberikan pada sistem. Dari pengukuran FRF dapat diperoleh informasi mengenai frekuensi pribadi sistem, bentuk modus getar sistem pada frekuensi pribadi tertentu dan rasio redaman sistem.

Apabila ada dua buah sinyal masukan  $x(t)$  dan sinyal keluaran  $y(t)$ , maka CSD secara matematik didefinisikan sebagai hasil transformasi Fourier dari fungsi *Cross-correlation* antara sinyal masukan dan sinyal keluaran ( $R_{xy}$ ), yaitu:

$$S_{xy} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

Fungsi *Cross-correlation* antara sinyal masukan  $x(t)$  dan keluaran  $y(t)$  ( $R_{xy}$ ), secara matematik didefinisikan sebagai:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot y(t+\tau) \cdot dt \quad (4)$$

ASD dari sinyal masukan  $x(t)$ , secara matematik didefinisikan sebagai hasil transformasi Fourier dari fungsi *Auto-correlation* dari sinyal masukan ( $R_{xx}$ ), yaitu:

$$S_{xx} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

Fungsi *Auto-correlation* dari sinyal masukan  $x(t)$ , secara matematik didefinisikan sebagai:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot x(t+\tau) \cdot dt \quad (6)$$

ASD dari sinyal keluaran  $y(t)$ , secara matematik didefinisikan sebagai hasil transformasi Fourier dari fungsi *Auto-correlation* dari sinyal keluaran ( $R_{yy}$ ), yaitu:

$$S_{yy} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{yy}(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (7)$$

Fungsi *Auto-correlation* dari sinyal keluaran  $y(t)$ , secara matematik didefinisikan sebagai:

$$R_{yy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(t) \cdot y(t+\tau) \cdot dt \quad (8)$$

## Metodologi

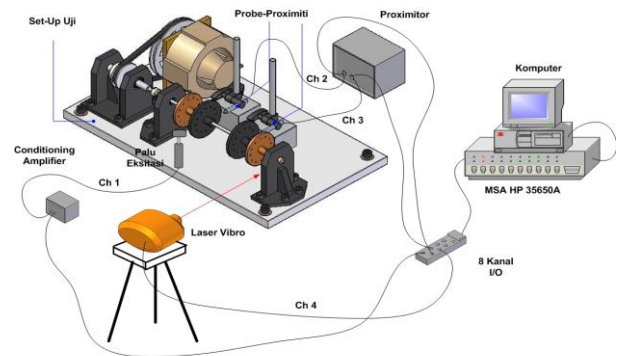
### Perangkat Pengukuran FRF

Dalam makalah ini, pengukuran FRF dilakukan dengan menggunakan metode eksitasi kejut (*shock excitation*). Dengan metode ini, gaya eksitasi berupa gaya impuls diberikan kepada sistem yang diukur, sehingga diharapkan sistem tersebut akan bergetar bebas pada frekuensi pribadinya. Susunan perangkat pengukuran FRF diperlihatkan pada Gambar 1. Pada gambar tersebut dapat dilihat jenis-jenis peralatan yang digunakan, yaitu sebagai berikut:

1. Palu eksitasi (*impact hammer*) tipe 8202 yang berfungsi untuk memberikan eksitasi berupa gaya impuls. *Impact hammer* dilengkapi dengan *load cell* yang berfungsi untuk mengukur besarnya gaya eksitasi yang diberikan. Palu eksitasi tersebut mempunyai spesifikasi sebagai berikut:
  - sensitivitas transduser: 1,01 pC/N
  - rentang frekuensi kerja: 0–7000 Hz
  - rentang pengukuran gaya: 100–5000 N
2. *Conditioning amplifier* merk Bruel & Kjaer tipe 2626 digunakan untuk mengkondisikan sinyal dari *load cell*. *Conditioning amplifier* yang

digunakan mempunyai spesifikasi sebagai berikut:

1. sensitivitas transduser: 1 – 1100 pC/ unit output
2. sensitivitas amplifier : 0,001 – 10 V/unit output
3. Probe-proximiti berfungsi untuk mengukur respon getaran (defleksi getaran) pada sistem poros-rotor akibat gaya eksitasi yang diberikan. Probe-proximiti yang digunakan untuk pengukuran defleksi getaran pada sistem poros-rotor ada dua, yaitu probe-proximiti dengan nomor seri Z 498191 dan Z 498190, dengan sensitivitas masing-masing probe-proximiti tersebut adalah sebesar 8,07 V/mm dan 8,2 V/mm.
4. Proximitor berfungsi untuk mengkondisikan sinyal yang dihasilkan probe-proximiti.
5. *Single point laser vibrometer* merk OMETRON berfungsi untuk mengukur respon getaran (kecepatan getaran) yang terjadi pada kedudukan bantalan sistem poros-rotor akibat gaya eksitasi yang diberikan. Sensor ini mempunyai sensitivitas 10 V/(m/s).
6. MSA yang berupa *mainframe* HP 35650A. Sinyal analog yang masuk ke modul input MSA disaring untuk mencegah terjadinya aliasing, kemudian dicuplik dan diubah menjadi data *digital*. Data *digital* hasil pencuplikan selanjutnya disimpan di dalam memori *time buffer*. Setelah itu dilakukan pengolahan, yaitu dengan mengubah data dari domain waktu ke dalam domain frekuensi dengan algoritma FFT (*Fast Fourier Transform*). Data hasil pengolahan kemudian dikirimkan ke komputer (PC) dengan menggunakan *HPIB interface*.
7. Perangkat komputer (PC) yang berfungsi untuk menampilkan dan menyimpan data hasil pengolahan MSA. Perangkat lunak yang digunakan untuk pengolahan data di komputer adalah HP 3566/67A.



Gambar 1. Susunan perangkat pengukuran FRF

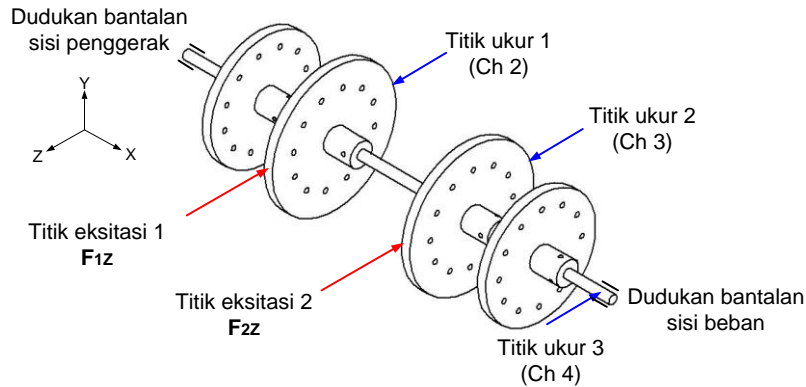
### Prosedur Pengukuran FRF

Sebelum pengukuran FRF dilakukan, terlebih dahulu ditentukan beberapa parameter pengukuran, yaitu:

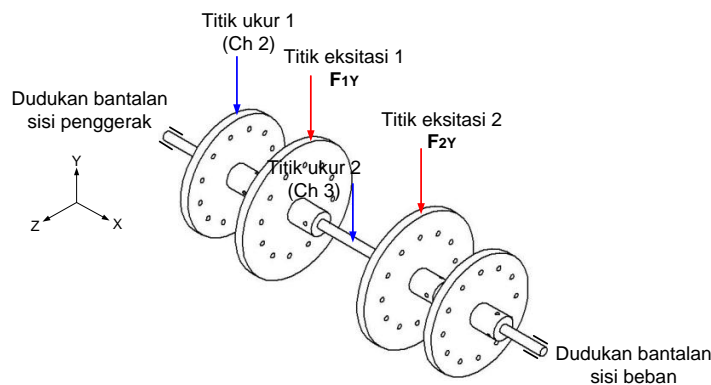
- rentang frekuensi pengukuran : 0 – 200 Hz
- kecermatan pengukuran : 0,5 Hz
- fungsi jendela (*window function*): *force/exponential*
- jenis perata-rataan : *stable*
- jumlah perata-rataan : 5 kali

Perata-rataan dilakukan untuk mengurangi kesalahan acak (*random error*) akibat adanya sinyal pengganggu (*random noise*).

Berdasarkan pertimbangan kemudahan dalam melakukan pengukuran, maka pengukuran FRF dilakukan dengan cara posisi sensor dibuat tetap sedangkan posisi gaya eksitasi dipindah-pindah. Pengukuran FRF dalam makalah ini dilakukan dalam arah horisontal dan vertikal. Pada pengukuran FRF dalam arah horisontal, gaya eksitasi diberikan pada sistem poros-rotor, sedangkan respon getaran diukur pada sistem poros-rotor dan kedudukan bantalannya secara simultan (lihat Gambar 2). Untuk pengukuran FRF dalam arah vertikal, gaya eksitasi diberikan ke sistem poros-rotor dan respon getaran hanya diukur pada sistem poros-rotor (lihat Gambar 3).



Gambar 2. Posisi titik eksitasi dan titik ukur pada pengukuran FRF arah horisontal



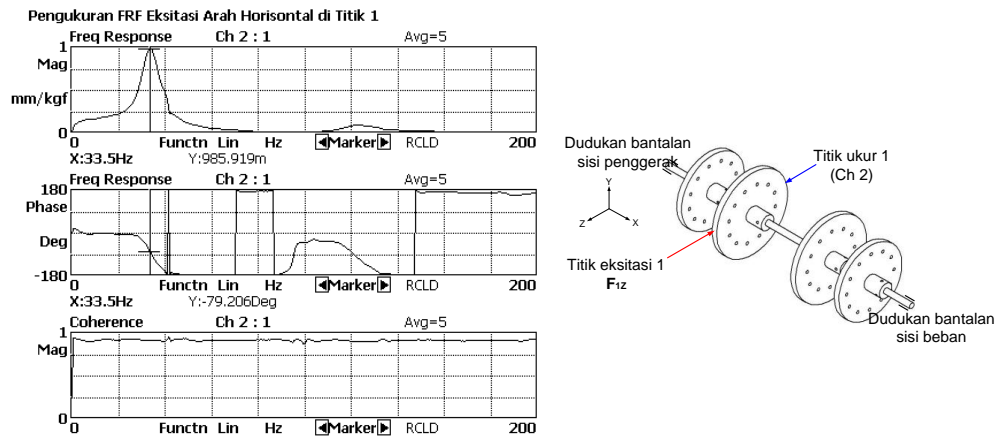
Gambar 3. Posisi titik eksitasi dan titik ukur pada pengukuran FRF arah vertical

## Hasil Penelitian dan Pembahasan

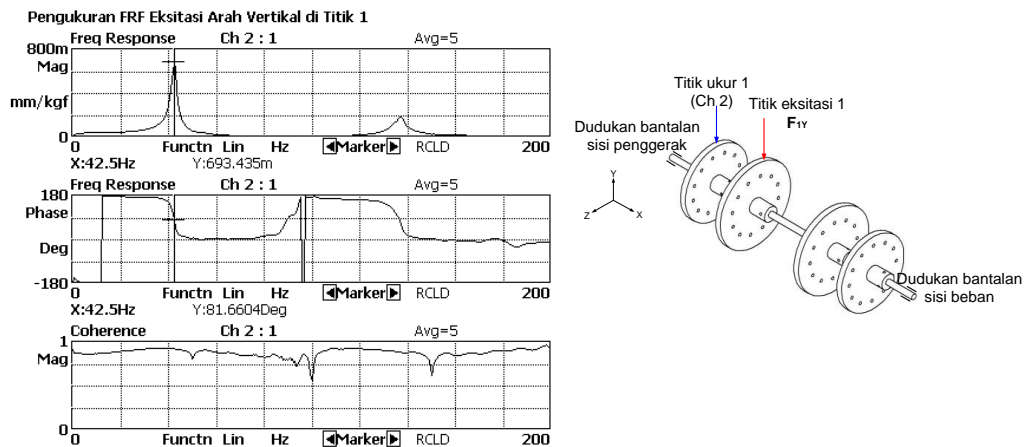
### Analisis Hasil Pengukuran FRF

Pada Gambar 4 diperlihatkan salah satu hasil pengukuran FRF dalam arah horisontal, sedangkan pada Gambar 5 diperlihatkan salah satu hasil pengukuran FRF dalam arah vertikal. Kurva FRF tersebut ditampilkan dalam tiga jendela, dimana masing-masing sumbu vertikal menyatakan magnitude, fasa dan koherensi sedangkan sumbu horisontal menyatakan besar frekuensi. Frekuensi pribadi adalah frekuensi dimana *magnitude* dari kurva FRF berharga maksimum. Untuk lebih memastikan

nilai frekuensi pribadi dapat dilihat berdasarkan sudut fasa yang nilainya mendekati  $90^0$  (positif atau negatif). Selain itu, perlu juga dilihat nilai koherensi pada frekuensi tersebut untuk mengetahui keakuratan dan keandalan data hasil pengukuran. Pada Gambar 4 terlihat bahwa frekuensi pribadi pertama sistem poros-rotor pada pengukuran dalam arah horisontal adalah sebesar 33,5 Hz dan frekuensi pribadi keduanya adalah sebesar 122 Hz. Sedangkan pada pengukuran dalam arah vertikal seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5, frekuensi pribadi pertamanya adalah sebesar 42,5 Hz dan frekuensi pribadi keduanya adalah sebesar 137 Hz.



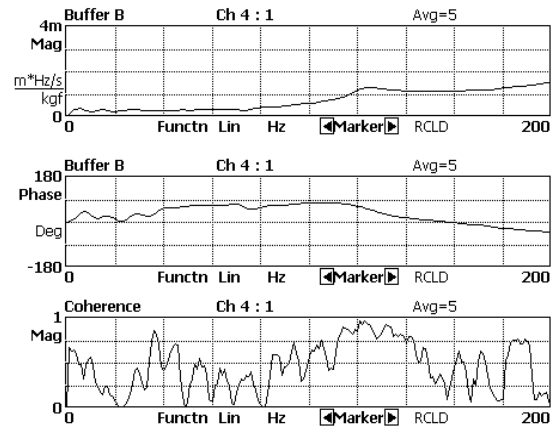
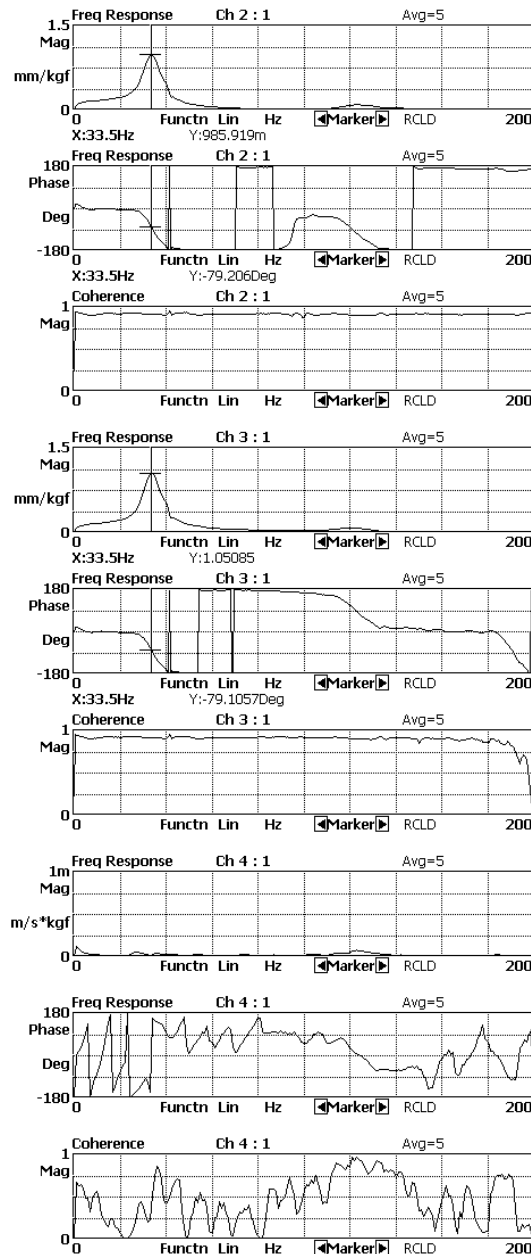
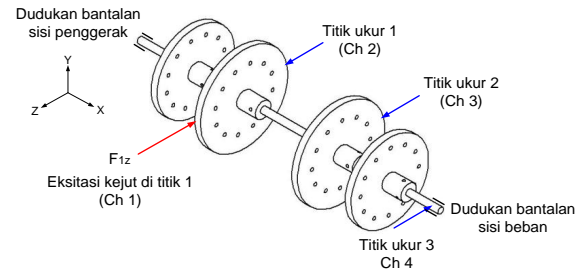
Gambar 4. Grafik hasil pengukuran FRF dalam arah horisontal



Gambar 5. Grafik hasil pengukuran FRF dalam arah vertikal

Pada Gambar 4 dan Gambar 5 dapat dilihat bahwa frekuensi pribadi sistem poros-rotor dalam arah vertikal lebih tinggi dibandingkan dengan frekuensi pribadi dalam arah horisontal. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh karena kekakuan tumpuan sistem poros-rotor dalam arah vertikal lebih tinggi dibandingkan dengan kekakuan tumpuan sistem poros-rotor dalam arah horisontal. Perbedaan kekakuan tumpuan sistem poros-rotor dalam arah horisontal dan vertikal, mungkin akibat adanya kelonggaran antara poros dan bantalannya. Dari kaji teoritik yang dilakukan oleh Tjahjowidodo [4], kelonggaran yang terjadi antara poros dan bantalan dapat menurunkan kekakuan sistem poros-rotor, sehingga menyebabkan penurunan frekuensi pribadi sistem poros-rotor.

Untuk membuktikan bahwa kekakuan dinamik sistem poros-rotor dalam arah horisontal jauh lebih rendah dibandingkan kekakuan dinamik dudukan bantalannya, maka grafik hasil pengukuran FRF sistem poros-rotor dan FRF dudukan bantalan diplot pada grafik yang sama, seperti yang terlihat pada gambar 6.



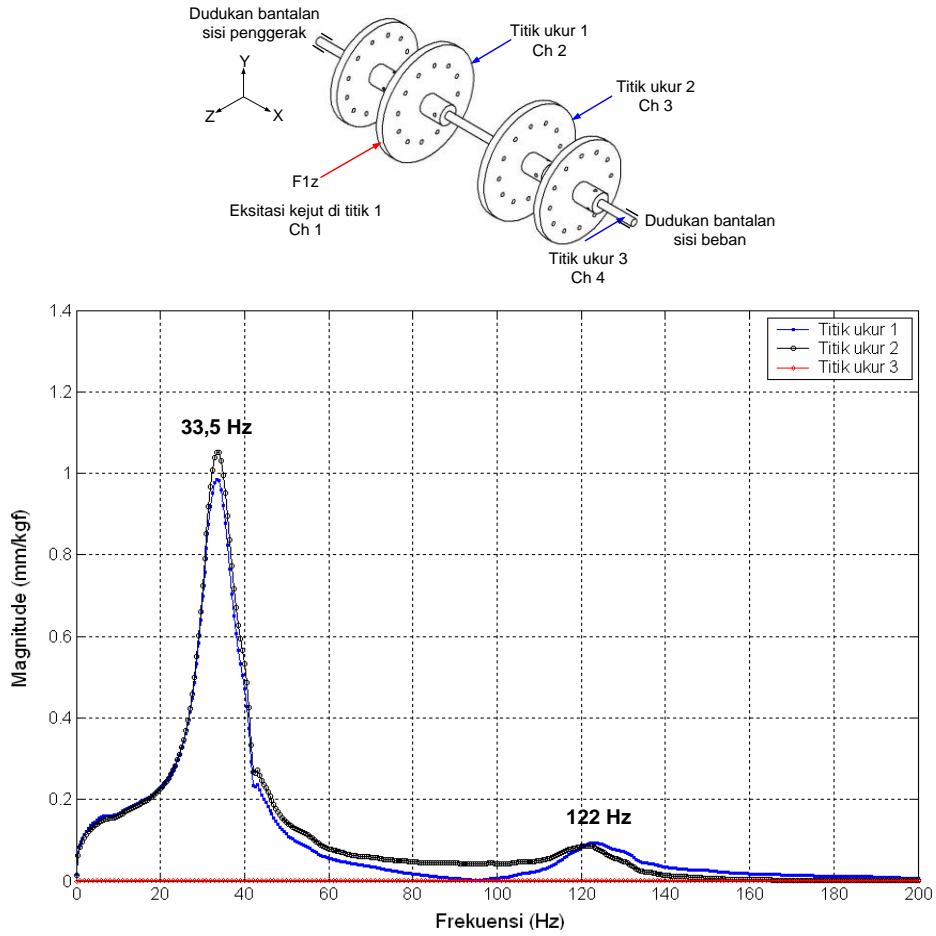
Gambar 6. Grafik hasil pengukuran FRF poros-rotor dan bantalan dalam arah horizontal

Karena respon getaran yang diukur pada dudukan bantalan berupa kecepatan getaran, maka respon getaran tersebut terlebih dahulu perlu diintegrasikan sekali terhadap waktu. Dengan demikian, dari hasil integrasi tersebut akan diperoleh respon getaran di dudukan bantalan sistem poros-rotor berupa defleksi getaran. Proses integrasi tersebut dilakukan secara numerik dengan menggunakan program *create math* yang terdapat pada perangkat lunak HP 3566/67A. Selanjutnya, file data hasil pengukuran FRF pada sistem poros-rotor dan file data pengukuran FRF pada dudukan bantalan sistem poros-rotor yang sudah diintegrasikan sekali, di *dump* dengan menggunakan program *view data* yang terdapat pada perangkat lunak HP 3566/67A. Proses *dump* tersebut akan menghasilkan file data dalam format *.txt*. Selanjutnya, file data pengukuran dalam format *.txt* diplot dengan menggunakan perangkat lunak. Hasil pengeplotan grafik FRF sistem poros-rotor dan dudukan bantalannya dapat dilihat pada Gambar 7 dan 8.

Pada Gambar 7 dan 8 terlihat bahwa pada rentang frekuensi dari nol sampai dengan frekuensi pribadi pertama, defleksi getaran yang terjadi pada sistem poros-rotor akibat gaya eksitasi tertentu yang diberikan pada sistem poros-rotor jauh lebih besar dibandingkan dengan defleksi getaran yang terjadi pada

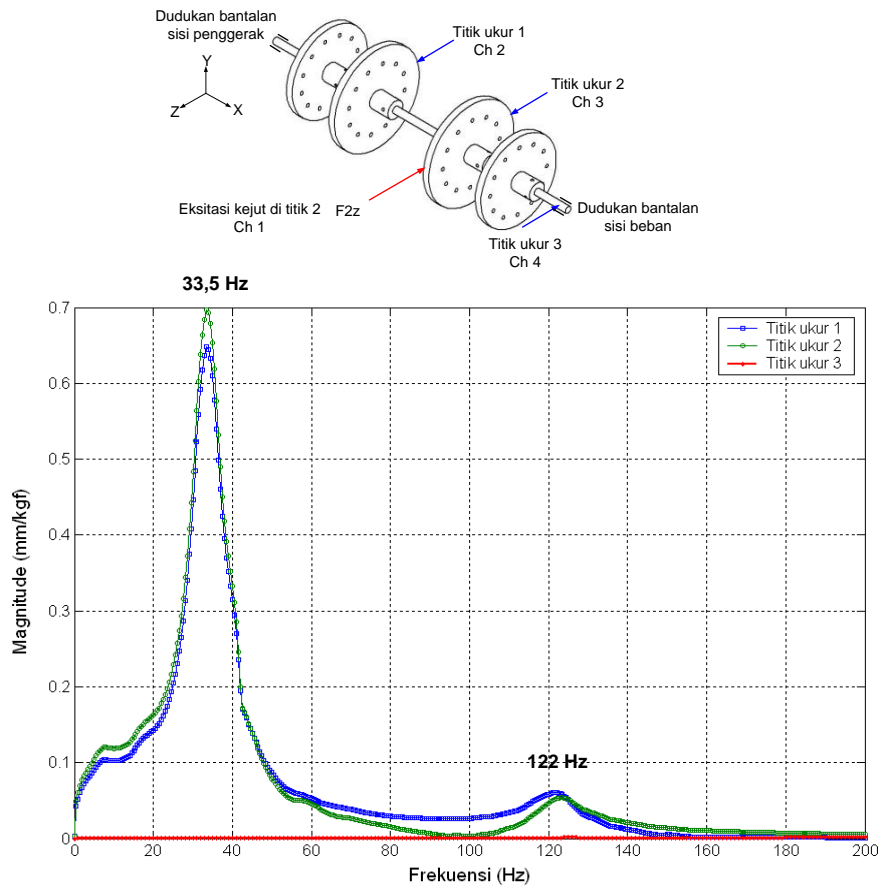
dudukan bantalannya. Pada rentang frekuensi tersebut, asumsi bahwa respon getaran yang terjadi pada sistem poros-rotor tidak dipengaruhi oleh bentuk modulus getar dudukan bantalannya dapat dibenarkan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kekakuan dinamik sistem poros-rotor pada rentang frekuensi tersebut jauh lebih rendah dibandingkan

dengan kekakuan dinamik dudukan bantalannya. Dengan kata lain, fleksibilitas dinamik sistem poros-rotor jauh lebih tinggi dibandingkan dengan fleksibilitas dinamik dudukan bantalannya.



Gambar 7. Perbandingan antara fleksibilitas dinamik sistem poros-rotor dan fleksibilitas dinamik dudukan bantalannya (gaya eksitasi di titik 1)





Gambar 8. Perbandingan antara fleksibilitas dinamik sistem poros-rotor dan fleksibilitas dinamik dudukan bantalan (gaya eksitasi di titik 2)

## Kesimpulan

- Pada rentang frekuensi ukur antara 0 dan 200 Hz sistem poros-rotor memiliki empat frekuensi pribadi dengan modus getar bending.
- Pengukuran FRF dalam arah horizontal untuk rentang frekuensi antara 0 dan 200 Hz, sistem poros-rotor memiliki dua frekuensi pribadi yang masing-masing sebesar 33,5 Hz dan 122 Hz.
- Pengukuran FRF dalam arah vertikal, untuk rentang frekuensi antara 0 dan 200 Hz, sistem poros-rotor memiliki dua frekuensi pribadi yang masing-masing 42,5 Hz dan 137 Hz.
- Kekakuan dinamik sistem poros-rotor pada rentang frekuensi dari nol hingga frekuensi pribadi

pertamanya jauh lebih rendah dibandingkan dengan kekakuan dinamik dudukan bantalannya.

## Daftar Rujukan

- Ewins, D.J., (1986), *Modal Testing: Theory and Practice*, Bruel & Kjaer.
- McConnell, K.G., (1995), *Vibration Testing: Theory and Practice*, John Wiley & Sons.
- Sturm, R.D., Kirk, D.E. (1994), "Contemporary Linear Systems Using Matlab", PWS Publishing Company.
- Tjahjowidodo, T., (1999), *Kaji Teoritik dan Analisis Respon Getaran Non-linier pada Sistem Poros-rotor Menggunakan Deret Fungsional Volterra*, Departemen Teknik Mesin ITB.



