

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

*Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009*

## M2-007 PENGEMBANGAN PROGRAM SIMULASI PENGUJIAN GETARAN BERBASIS MATLAB

**Zainal Abidin, Jimmy Deswidawansyah**

Laboratorium Dinamika, PPAU-IImu Rekayasa ITB, Jl. Ganesa 10, Bandung 40132  
Telp : 022-2506283 Fax : 022-2534099. E-mail : za@dynamic.pauir.itb.ac.id

### **Ringkasan**

*Makalah ini membahas tentang pengembangan perangkat lunak yang mampu mensimulasikan pengujian getaran dengan menggunakan DSA (Dynamic Signal Analyser). Dengan program yang dibuat diharapkan siswa dapat memahami cara memilih parameter pengujian dengan benar dan siap terjun untuk melakukan pengujian yang sebenarnya sehingga tidak lagi mencoba-coba pada peralatan yang mahal. Beberapa parameter yang perlu dipilih dalam pengujian getaran meliputi span frekuensi, jumlah garis (line number), jenis window, jumlah dan jenis perata-rataan, level dan lama waktu pre-trigger.*

*Program simulasi pengujian getaran yang dibuat dikembangkan berbasis Matlab. Adapun sistem uji yang dapat disimulasikan dalam program ini adalah sistem getaran satu dan dua derajat kebebasan. Respon getaran yang dapat diamati meliputi respon getaran domain waktu (waveform) dan respon getaran domain frekuensi (spectrum). Hasil pengujian getaran yang dapat diperoleh meliputi FRF (Fungsi Response Frekuensi) sistem getaran teoritis dan FRF hasil pengujian tersimulasi dimana sinyal getarannya dapat dicemari oleh derau. Fungsi korelasi, spektrum diri (auto correlation) dan cross corellation juga dapat ditampilkan dalam simulasi ini.*

*Kata Kunci : DSA, Fungsi Respon Frekuensi (FRF), koherensi, perata-rataan (averaging), derau.*

## **1. PENDAHULUAN**

Salah satu mata kuliah pilihan yang diberikan kepada mahasiswa S1 tingkat akhir dan mahasiswa S2 di Prodi Mesin FTMD ITB adalah matakuliah Getaran Eksperimental. Dalam mata kuliah ini diajarkan teknik-teknik pengukuran getaran untuk tujuan pemodelan maupun identifikasi. Untuk memahami proses pengujian getaran, idealnya materi diberikan dalam bentuk praktik yaitu menggunakan instrument DSA. Masalahnya, harga peralatan semacam ini cukup mahal sehingga satu institusi biasanya hanya memiliki satu buah peralatan. Padahal, agar efektif satu group praktikum sebaiknya tidak terdiri lebih dari 4 orang siswa. Akibatnya, pemakaian peralatan semacam ini sebagai alat bantu kuliah harus dijadualkan secara ketat karena alat tersebut biasanya juga digunakan sebagai peralatan untuk riset tugas akhir. Selain itu, pemakaian alat ini perlu pemantauan yang serius agar kerusakan pelatatan tidak terjadi akibat kesalahan prosedur pemakaian.

Salah satu alternatif untuk menanggulangi masalah ini dapat dilakukan dengan mengembangkan alat bantu pembelajaran yaitu sebuah program simulasi yang dapat memberikan gambaran mengenai proses pengujian getaran dengan DSA. Dengan program yang dikembangkan diharapkan siswa dapat melakukan pengujian getaran secara tersimulasi sebelum ia benar-benar melakukan pengujian nyata. Hal ini karena banyak parameter pengukuran getaran yang perlu dipilih secara benar agar hasil yang didapat cukup akurat. Beberapa parameter pengujian yang perlu dipilih dengan benar diantaranya adalah span frekuensi pengukuran, jumlah garis (line number), jenis window, jumlah dan jenis perata-

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

rataan, level dan lama waktu pre-trigger dll. Pemahaman tentang efek masing-masing parameter pengujian terhadap hasil yang dicapai diharapkan juga dapat dipelajari dalam program simulasi ini.

Program simulasi pengujian getaran yang dibuat dikembangkan berbasis Matlab. Sistem getaran yang dapat disimulasikan dengan program ini meliputi sistem getaran satu dan dua derajat kebebasan. Batasan ini dipilih karena sistem getaran dua derajat kebebasan dinilai cukup sederhana dan masih mampu memberikan gambaran tentang sistem getaran banyak derajat kebebasan. Sebenarnya, program yang dibuat siap dikembangkan lebih lanjut untuk sistem getaran yang memiliki banyak derajat kebebasan karena penyelesaiannya matematiknya serupa. Walaupun demikian diperlukan penataan grafik lebih lanjut agar tampilan yang diperoleh tetap menarik.

## 2. DASAR TEORI

Semua sistem yang memiliki massa dan kekakuan pasti mampu bergetar. Secara umum getaran terbagi dua, yaitu getaran bebas dan getaran paksa. Getaran bebas terjadi jika tidak ada gaya dari luar yang mengeksitasi sistem. Getaran bebas menyebabkan sistem bergetar pada frekuensi pribadinya. Getaran paksa terjadi bila ada gaya luar yang mengeksitasi sistem. Getaran paksa menyebabkan sistem bergetar pada frekuensi eksitasi.

Banyaknya koordinat bebas yang digunakan untuk menggambarkan gerakan sistem disebut derajat kebebasan (DK).

### 2.1 Konsep Getaran [1]

Secara umum, sistem getaran yang memiliki banyak derajat kebebasan memiliki diagram benda bebas seperti yang tampak pada Gambar 1. Untuk sistem  $m_i$  yang tampak pada gambar ini maka Hukum Newton II dapat ditulis sebagai berikut:

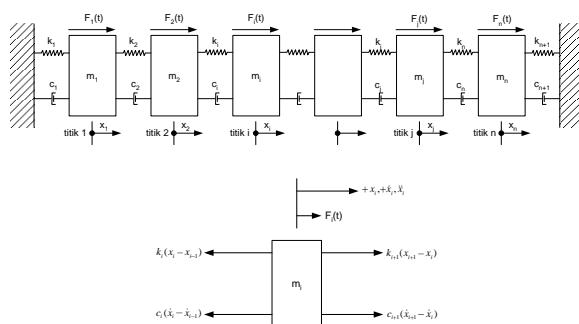
$$m_i \ddot{x}_i = \sum_j F_{ij} \quad (1)$$

Berdasarkan gaya-gaya yang bekerja pada sistem  $m_i$ , sebagaimana tampak pada Gambar 1, selanjutnya dapat diturunkan persamaan berikut ini

$$\begin{aligned} m_i \ddot{x}_i &= -k_i(x_i - x_{i-1}) + k_{i+1}(x_{i+1} - x_i) - c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) \\ &\quad + c_{i+1}(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + F_i; \quad i = 2, 3, \dots, n-1 \end{aligned}$$

atau

$$\begin{aligned} m_i \ddot{x}_i - c_i \dot{x}_{i-1} + (c_i + c_{i+1}) \dot{x}_i - c_{i+1} \dot{x}_{i+1} - k_i x_{i-1} \\ + (k_i + k_{i+1}) x_i - k_{i+1} x_{i+1} = F_i \quad i = 2, 3, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (2)$$



Gambar 1 Sistem getaran yang memiliki derajat kebebasan banyak

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

***Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009***

Selanjutnya, persamaan gerak dari massa  $m_1$  dapat diperoleh dengan mensubstitusikan  $i=1$  dan  $x_0=0$  dalam persamaan (2). Serupa dengan langkah ini, persamaan gerak untuk  $m_n$  diperoleh dengan mensubstitusikan  $i=n$  dan  $x_{n+1}=0$ . Kedua langkah ini menghasilkan persamaan gerak berikut

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = F_1 \quad (3)$$

$$m_n \ddot{x}_n - c_n \dot{x}_{n-1} + (c_n + c_{n+1}) \dot{x}_n - k_n x_{n-1} + (k_n + k_{n+1})x_n = F_n \quad (4)$$

Persamaan (2), (3) dan (4) dapat dinyatakan dalam bentuk matriks berikut

$$[m] \ddot{\vec{x}} + [c] \dot{\vec{x}} + [k] \vec{x} = \vec{F} \quad (5)$$

dimana  $[m]$ ,  $[c]$ , dan  $[k]$  masing-masing adalah matriks massa, redaman, dan kekakuan yang didefinisikan sebagai berikut

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & m_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & (c_3 + c_4) & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -c_n & (c_n + c_{n+1}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_n & (k_n + k_{n+1}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dalam persamaan (5),  $\vec{x}$ ,  $\dot{\vec{x}}$ ,  $\ddot{\vec{x}}$ , dan  $\vec{F}$  masing-masing adalah vektor perpindahan, kecepatan, percepatan, dan gaya, yang didefinisikan oleh persamaan berikut ini

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix}, \quad \dot{\vec{x}} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) \end{pmatrix},$$

$$\ddot{\vec{x}} = \begin{pmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_n(t) \end{pmatrix}, \quad \bar{F} = \begin{pmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ \vdots \\ F_n(t) \end{pmatrix} \quad (9)$$

## 2.2 Fungsi Respon Frekuensi [2,3]

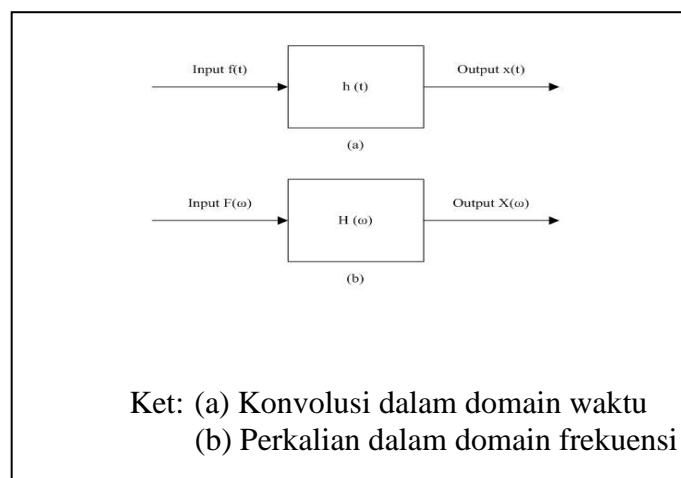
Fungsi respon frekuensi (FRF) merupakan fungsi yang menghubungkan antara sinyal masukan dan sinyal keluaran. Untuk sistem getaran 1 DK makafungsi respon frekuensi dapat dituliskan sebagai berikut

$$X(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (10)$$

Dimana  $F(\omega)$  = transformasi Fourier dari sinyal masukan  $f(t)$ ,

$X(\omega)$  = transformasi Fourier dari sinyal keluaran  $x(t)$ .

Dalam domain t, hubungan di atas menggambarkan hubungan antara sinyal masukan  $f(t)$  dan sinyal keluaran  $x(t)$ . Hubungan ini bisa dimodelkan dengan diagram blok seperti pada Gambar 2.



**Gambar 2** Model linier masukan-keluaran

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

*Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009*

Estimasi FRF dengan menggunakan persamaan (10) ini dapat digunakan untuk sinyal masukan dan keluaran yang bebas dari derau. Bila digunakan untuk sinyal yang umum dijumpai dalam praktik, yaitu sinyal yang mengandung derau, maka persamaan (10) akan menghasilkan kesalahan. Oleh karena itu, diperlukan metode perhitungan yang berlaku bagi sinyal yang mengandung derau. Ada tiga metode yang dapat digunakan untuk mengestimasi FRF ( $H(\omega)$ ).

Estimasi pertama dari  $H(\omega)$  disebut  $H_1(\omega)$  dan diperoleh dengan mengalikan kedua sisi persamaan (10) dengan  $F^*(\omega)$  untuk mendapatkan

$$F^*(\omega)X(\omega) = H(\omega)F^*(\omega)F(\omega) \quad (11)$$

Kemudian persamaan di atas ditulis menjadi

$$S_{fx}(\omega) = H(\omega)S_{ff}(\omega) \quad (12)$$

dimana :

$S_{fx}(\omega)$  adalah spektrum silang dua sisi ( $\pm\omega$ ) antara sinyal masukan dan sinyal keluaran,

$S_{ff}(\omega)$  adalah spektrum diri dua sisi ( $\pm\omega$ ) dari sinyal masukan.

Sehingga dari persamaan (12) diperoleh

$$H(\omega) = \frac{S_{fx}(\omega)}{S_{ff}(\omega)} \equiv H_1(\omega) \text{ untuk } -\infty < \omega < +\infty$$

Atau bila digunakan spektrum sisi tunggal ( $+\omega$ ), maka  $S_{fx}(\omega)$  ditulis sebagai  $G_{fx}(\omega)$  dan  $S_{ff}(\omega)$  ditulis sebagai  $G_{ff}(\omega)$  sehingga

$$H(\omega) = \frac{G_{fx}(\omega)}{G_{ff}(\omega)} \equiv H_1(\omega) \text{ untuk } 0 < \omega < +\infty \quad (13)$$

Estimasi kedua dari  $H(\omega)$  disebut  $H_2(\omega)$  dan diperoleh dengan mengalikan kedua sisi persamaan (10) dengan  $X^*(\omega)$  untuk mendapatkan

$$\begin{aligned} X^*(\omega)X(\omega) &= H(\omega)X^*(\omega)F(\omega) \\ S_{xx}(\omega) &= H(\omega)S_{xf}(\omega) \end{aligned} \quad (14)$$

$$H(\omega) = \frac{S_{xx}(\omega)}{S_{xf}(\omega)} \equiv H_2(\omega) \text{ untuk } -\infty < \omega < +\infty$$

atau

$$H(\omega) = \frac{G_{xx}(\omega)}{G_{xf}(\omega)} \equiv H_2(\omega) \text{ untuk } 0 < \omega < +\infty \quad (15)$$

Harga  $H_1(\omega)$  dan  $H_2(\omega)$  yang diperoleh dari pengujian seringkali berbeda, tergantung pada keberadaan derau (apakah derau berada pada masukan, keluaran, atau keduanya). Secara teoritis, fasa pada kedua estimasi  $H(\omega)$  tersebut bernilai sama karena  $G_{xf}(\omega)$  dan  $G_{fx}(\omega)$  merupakan konjugasi kompleks satu sama lain, jadi  $G_{xf}(\omega) = G_{fx}^*(\omega)$  atau  $G_{fx}(\omega) = G_{xf}^*(\omega)$ .

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

*Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009*

Metode perhitungan ketiga disebut  $H_a(\omega)$  dan diperoleh dengan menggunakan harga absolut dari kedua sisi persamaan (10) untuk mendapatkan

$$X^*(\omega)X(\omega) = H^*(\omega)H(\omega)F^*(\omega)F(\omega)$$

atau

$$S_{xx}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{ff}(\omega) \quad (16)$$

Persamaan (16) melibatkan spektrum diri  $S_{yy}(\omega)$  dan  $S_{xx}(\omega)$  sehingga tidak ada informasi fasa dalam estimasi  $H(\omega)$ ; hanya besaran absolut  $H(\omega)$  yang dapat ditentukan. Dari persamaan (16) dapat diperoleh

$$|H(\omega)|^2 = \frac{S_{xx}(\omega)}{S_{ff}(\omega)} \equiv |H_a(\omega)|^2 \text{ untuk } -\infty < \omega < +\infty$$

atau

$$|H(\omega)|^2 = \frac{G_{xx}(\omega)}{G_{ff}(\omega)} \equiv |H_a(\omega)|^2 \text{ untuk } 0 < \omega < +\infty \quad (17)$$

sebagai estimasi besaran absolut FRF.

Untuk mengetahui seberapa erat hubungan antara sinyal keluaran dan sinyal masukan, sebuah fungsi koherensi  $\gamma^2(\omega)$  dapat digunakan. Fungsi koherensi berhubungan dengan kuadrat koefisien korelasi dan diberikan oleh

$$\gamma^2(\omega) = \frac{|G_{fx}(\omega)|^2}{G_{ff}(\omega)G_{xx}(\omega)} = \frac{|S_{fx}(\omega)|^2}{S_{ff}(\omega)S_{xx}(\omega)} \quad (18)$$

Fungsi koherensi ini merupakan sebuah ukuran dari hubungan antara sinyal keluaran dan sinyal masukan pada setiap frekuensi  $\omega$  dan diskalakan dari 0 sampai 1. Perlu dicatat bahwa fungsi koherensi diperoleh berdasarkan proses perata-rataan statistika dalam kuantitas  $G_{fx}(\omega)$ ,  $G_{ff}(\omega)$ , dan  $G_{xx}(\omega)$ . Bila persamaan (18) digunakan pada sebuah pengukuran tunggal, maka koherensinya bernilai satu, walau terdapat noise pada sinyal, karena tidak adanya informasi yang tersedia sebagai indikasi bahwa sinyal keluaran bukan disebabkan oleh adanya sinyal masukan. Koherensi bisa mendeteksi adanya ‘the lack of relationship’ apabila pengujian dilakukan beberapa kali dan dilakukan proses perata-rataan (averaging).

Fungsi koherensi juga dapat dituliskan sebagai

$$\gamma^2(\omega) = \frac{H_1(\omega)}{H_2(\omega)} \quad (19)$$

karena  $G_{fx}(\omega)$  dan  $G_{xf}(\omega)$  merupakan konjugasi kompleks. Implikasi dari persamaan (19) adalah bahwa  $H_1(\omega) \leq H_2(\omega)$  karena koherensi selalu bernilai  $\leq 1$ .

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Untuk mendapatkan fungsi transfer dari sistem banyak DK biasanya pada persamaan (5) dilakukan transformasi Fourier sehingga diperoleh hubungan berikut:

$$\tilde{X}(\omega) = [H(\omega)] \tilde{F}(\omega) \quad (20)$$

dimana

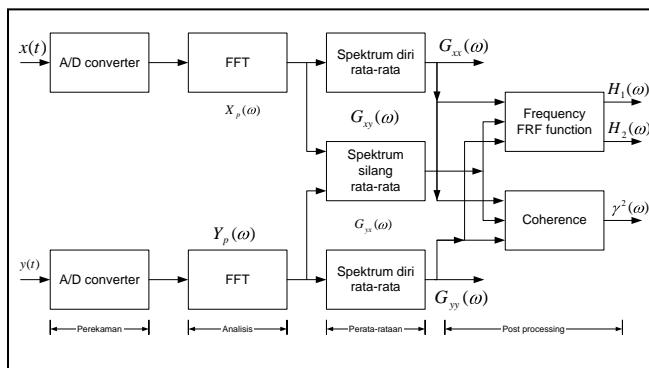
$$[H(\omega)] = \begin{bmatrix} 1 & \omega^2 \\ 1 & i\omega \end{bmatrix}^{-1} \quad (21)$$

Untuk system 2 DK maka matriks  $[H(\omega)]$  dapat ditulis sebagai berikut:

$$[H(\omega)] = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & H_{12}(\omega) \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) \end{bmatrix} \quad (22)$$

## 2.3 Konsep Penganalisis Spektrum [3]

Sebuah instrumen penganalisis spektrum dua kanal memiliki kanal masukan dan keluaran dan diagram blok seperti tampak pada Gambar 3.. Diagram blok ini sebenarnya juga menggambarkan urutan proses pengolahan data yang terjadi di dalamnya.



Gambar 3 Diagram blok penganalisis spektrum dua kanal

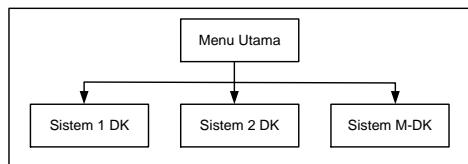
Di bagian depan dari *A/D converter* sebenarnya terdapat filter anti aliasing berfungsi untuk mencegah terlipatnya sinyal frekuensi tinggi menjadi sinyal frekuensi rendah. Selanjutnya *A/D converter* berfungsi untuk mengubah sinyal waktu kontinu menjadi sinyal waktu diskrit. Sinyal ini kemudian dikalikan dengan fungsi jendela tertentu untuk memperkecil terjadinya kebocoran spektrum. Analisis FFT selanjutnya dilakukan untuk menghasilkan spektrum untuk setiap kanal. Spektrum-spektrum ini kemudian digunakan untuk menghasilkan spektrum diri rata-rata (averaged auto-spectra) dan spektrum silang rata-rata (averaged cross-spectra) melalui proses perata-rataan. Kemudian spektrum diri rata-rata dan spektrum silang rata-rata ini digunakan untuk menghasilkan FRF dan fungsi koherensi (post-processing).

## 3. STRUKTUR DAN ORGANISASI PROGRAM

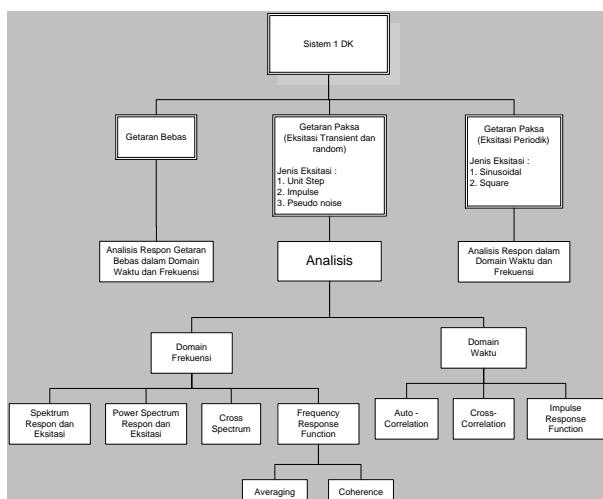
Konsep utama dari program simulasi yang dikembangkan adalah mensimulasikan sebuah proses pengujian getaran. Program ini bekerja berdasarkan teori dasar yang telah dijelaskan sebelumnya. Program ini dikembangkan berbasis MATLAB® 6 R13.

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

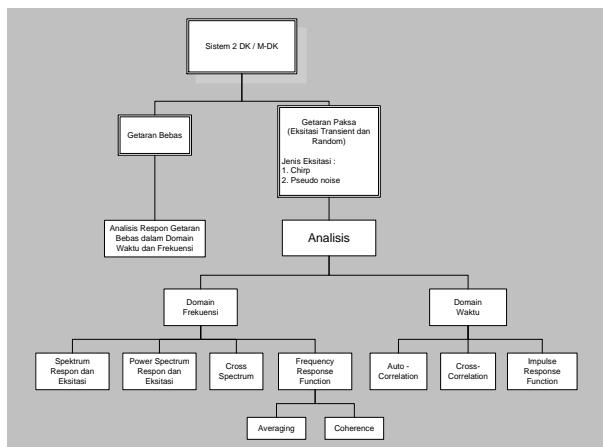
*Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009*



**Gambar 4** Organisasi utama program



(a)



(b)

**Gambar 5** Organisasi program simulasi untuk:

- (a) Sistem 1 DK
- (b) Sistem 2 DK dan M-DK

Struktur organisasi utama program simulasi ditunjukkan pada Gambar 4. Untuk sistem 1 DK, struktur organisasi program ditunjukkan oleh Gambar 5 (a) dan untuk 2 DK/M-DK, oleh Gambar 5 (b). Program ini dapat menampilkan simulasi getaran bebas (hanya untuk sistem 1 DK) dan getaran paksa

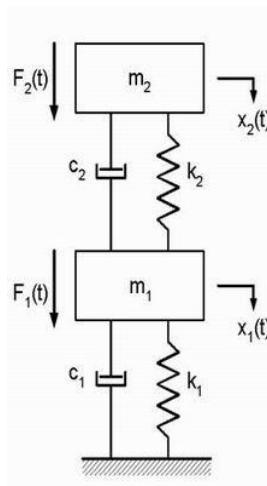
(untuk 1 DK, 2 DK dan M-DK). Untuk getaran paksa, ada dua macam analisis yang dapat ditampilkan, yaitu analisis dalam domain frekuensi dan analisis dalam domain waktu.

## 4. CONTOH TAMPILAN DAN VALIDASI HASIL

Model getaran 2 DK, seperti pada Gambar 6, akan digunakan untuk mengecek validasi program yang telah dibuat. Sistem ini memiliki data sebagai berikut :

|   |             |
|---|-------------|
| Massa pertama ( $m_1$ )                   | = 1 kg      |
| Massa kedua ( $m_2$ )                     | = 1 kg      |
| Kekakuan pegas pertama ( $k_1$ )          | = 2500 N/m  |
| Kekakuan pegas kedua ( $k_2$ )            | = 5000 N/m  |
| Redaman pertama ( $c_1$ )                 | = 10 N. s/m |
| Redaman kedua ( $c_2$ )                   | = 10 N. s/m |
| Simpangan awal pertama ( $x_1(0)$ )       | = 0,01 m    |
| Kecepatan awal pertama ( $\dot{x}_1(0)$ ) | = 0,01 m/s  |
| Simpangan awal kedua ( $x_2(0)$ )         | = 0,1 m     |
| Kecepatan awal kedua ( $\dot{x}_2(0)$ )   | = 0,01 m/s  |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| Frekuensi pribadi teoritis pertama ( $f_1$ ) | = | 5,269 Hz   |
| Frekuensi pribadi teoritis kedua ( $f_2$ )   | = | 16,99 Hz   |
| Frekuensi sampel                             | = | 50 Hz      |
| Lebar jendela                                | = | 1024       |
| Fungsi jendela                               | = | Hanning    |
| Model FRF teoritis (red. viskos)             | = | kasus umum |



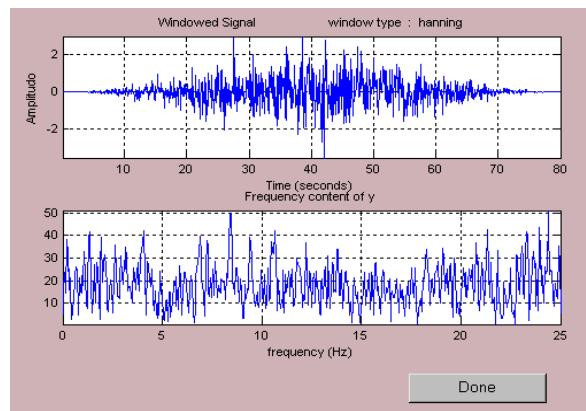
**Gambar 6**      Sistem getaran 2 DK

Jenis eksitasi *pseudorandom* digunakan karena eksitasi ini memiliki kandungan frekuensi yang banyak. Contoh sinyal eksitasi *pseudorandom* tampak pada Gambar 7.

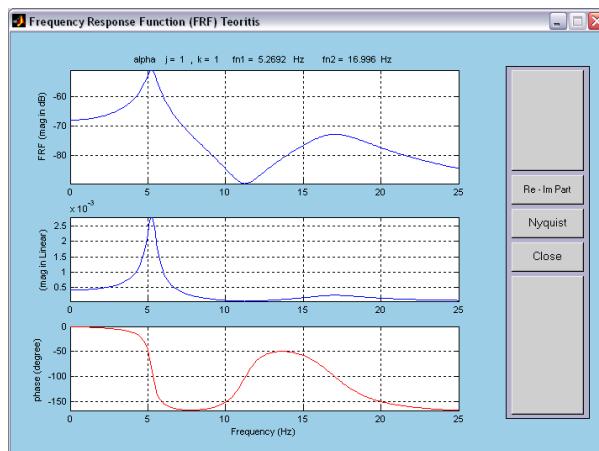
Berdasarkan data tersebut dapat dibuat diagram Bodé, teoritis. Diagram ini dapat ditampilkan sebagai FRF magnitude (dB), FRF magnitude linier, dan fasa sebagaimana tampak pada Gambar 8.

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

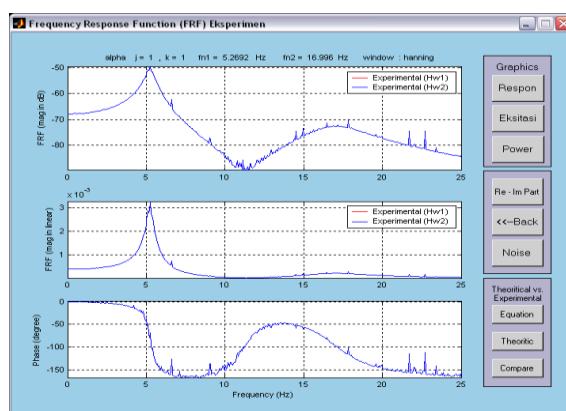


**Gambar 7** Contoh sinyal *pseudorandom*



**Gambar 8** Diagram Bodé teoritis

Hasil FRF simulasi eksperimen untuk sistem getaran 2 DK di atas yang diperoleh dengan sinyal eksitasi *pseudorandom* ditunjukkan oleh Gambar 9.



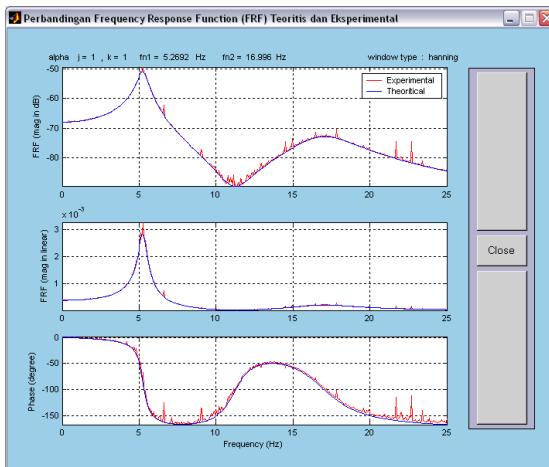
**Gambar 9** Diagram Bodé untuk FRF simulasi eksperimen

Bila kedua FRF tersebut ditumpuk, maka dapat dibandingkan perbedaan antar keduanya. Perbandingan ini ditampilkan pada Gambar 10.

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

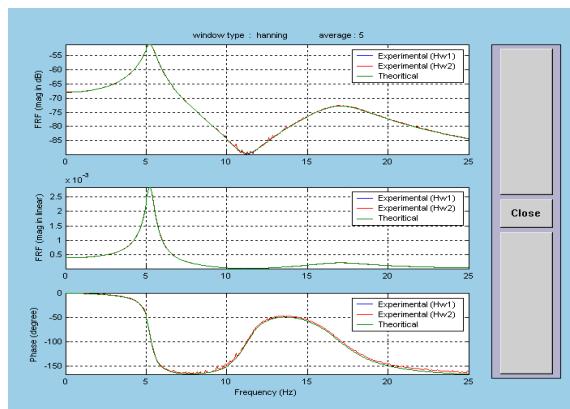
*Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009*

Dari perbandingan tersebut dapat disimpulkan bahwa FRF hasil simulasi eksperimen belum begitu mendekati harga teoritis. Hal ini terjadi karena sifat sinyal eksitasi random memiliki kandungan frekuensi yang berbeda-beda pada tiap selang frekuensi. Bila harga FRF pada selang frekuensi sembarang diamati dan simulasi diulangi lagi dengan sinyal random yang berbeda, maka harga FRF pada selang frekuensi tersebut juga akan berbeda. Oleh karena itu, proses perata-rataan sangat dibutuhkan dalam pengujian FRF.



**Gambar 10** Perbandingan FRF simulasi eksperimen dan teoritis

Bila proses perata-rataan (averaging) dilakukan, maka diperoleh hasil simulasi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 11 (untuk jumlah perata-rataan sebanyak lima kali) dan Gambar 12 (untuk jumlah perata-rataan sebanyak sepuluh kali).

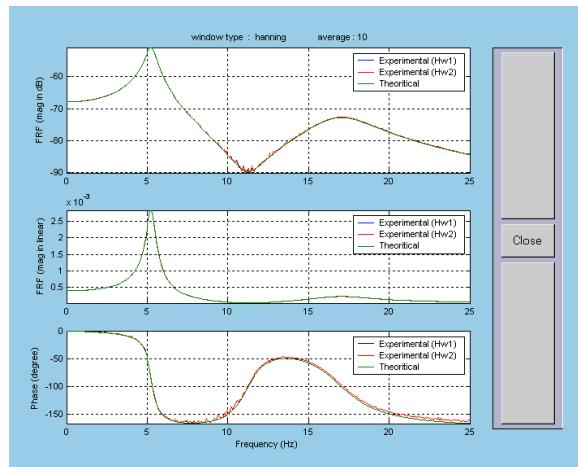


**Gambar 11** Perbandingan diagram Bodé (perata-rataan 5 kali)

Kedua gambar tersebut menunjukkan perbandingan harga antara FRF teoritis dan FRF simulasi eksperimen hasil proses perata-rataan. Dari perbandingan tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah perata-rataan yang digunakan, FRF simulasi eksperimen akan semakin mendekati harga teoritisnya. Dari kedua grafik FRF di atas juga dapat disimpulkan bahwa frekuensi pribadi sistem memiliki harga yang sama dengan frekuensi pribadi teoritis, yaitu 5,269 Hz dan 16,99 Hz.

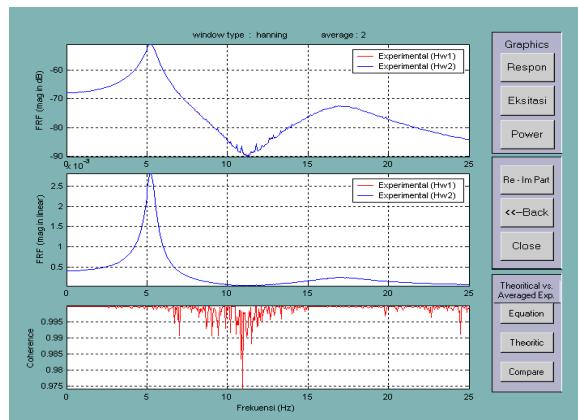
# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009



Gambar 12 Perbandingan diagram Bodé (perata-rataan 10 kali)

Grafik FRF dan fungsi koherensi yang diperoleh setelah perata-rataan sebanyak dua kali ditunjukkan pada Gambar 13 dan setelah perata-rataan sebanyak sepuluh kali ditunjukkan pada Gambar 14. Fungsi koherensi hanya dapat dilihat setelah proses perata-rataan dilakukan lebih dari dua kali.



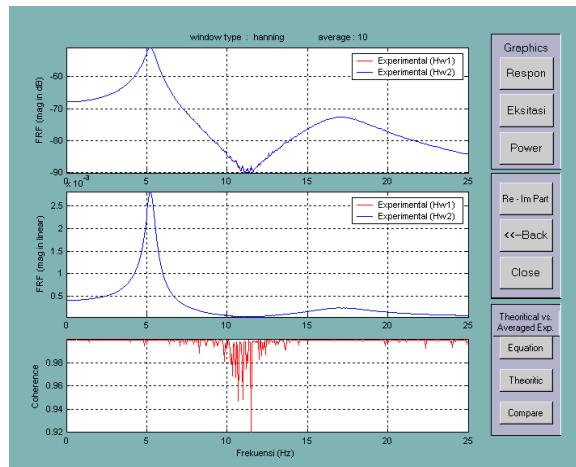
Gambar 13 FRF simulasi eksperimen setelah perata-rataan 2 kali

Dari dua grafik pada Gambar 13 dan Gambar 14 dapat dilihat perbedaan harga koherensi bila jumlah perata-rataan ditingkatkan. Di sini dapat disimpulkan bahwa proses perata-rataan mempengaruhi harga koherensi dan semakin banyak jumlah perata-rataan, maka harga koherensi semakin mendekati satu. Ini berarti semakin baik pula harga FRF yang diperoleh.

FRF sistem 2 DK memiliki lembah curam yang berada di antara dua puncaknya, yang disebut *antiresonansi* (kebalikan dari resonansi). Dari Gambar 13 dan Gambar 14, dapat dilihat bahwa harga koherensi pada bagian *antiresonansi* relatif lebih kecil dibandingkan dengan koherensi pada bagian puncak resonansi. Ini berarti harga FRF rata-rata pada bagian *antiresonansi* relatif kurang bagus bila dibandingkan dengan harga FRF pada puncak-puncak resonansi. *Antiresonansi* merupakan ciri dari *point FRF*, yaitu FRF yang diukur dengan posisi transduser respon dan eksitasi terletak pada satu titik.

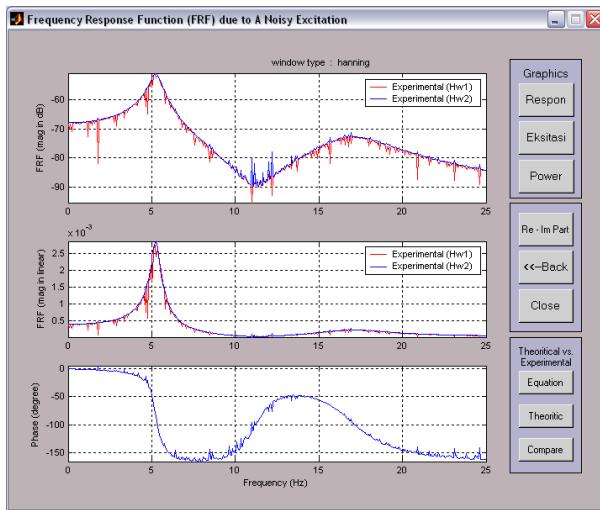
# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

*Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009*



**Gambar 14** FRF simulasi eksperimen setelah perata-rataan 10 kali

Salah satu kondisi yang menyebabkan harga koherensi menjadi turun ketika melakukan pengukuran FRF adalah adanya sinyal pengganggu (noise) pada sinyal yang akan dianalisis. Program simulasi ini dapat menampilkan hasil simulasi FRF sistem getaran dimana sinyal eksitasinya (atau sinyal responnya) mengandung noise.



**Gambar 15** Diagram Bodé simulasi noise pada Eksitasi

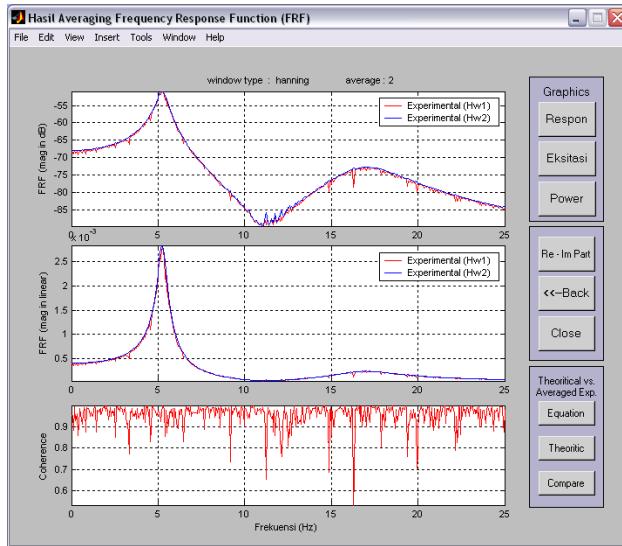
Untuk simulasi sinyal pengganggu (noise) pada sinyal eksitasi, sistem getaran yang digunakan sama dengan sistem yang digunakan pada pembahasan sebelumnya. Sinyal pengganggu (noise) hanya terdapat pada sinyal eksitasi. Model FRF teoritis adalah kasus umum redaman viskos dan grafiknya diberikan oleh Gambar 8.

FRF hasil simulasi dapat ditampilkan dengan menekan tombol *Noise* pada panel yang tersedia. Tombol *Pada Eksitasi* akan menampilkan grafik FRF simulasi eksperimen seperti yang tampak pada Gambar 15.

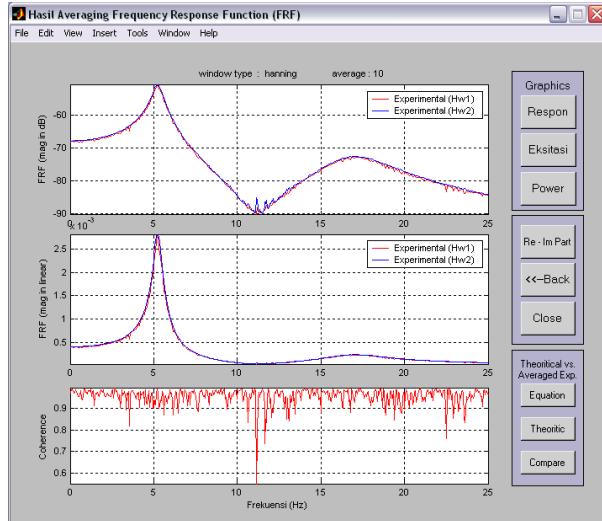
# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

**Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009**

Hasil simulasi FRF setelah perata-rataan dan fungsi koherensi yang disebabkan oleh eksitasi yang mengandung sinyal pengganggu ditunjukkan oleh Gambar 16 sampai dan Gambar 17.



**Gambar 16**FRF setelah perata-rataan 2 kali

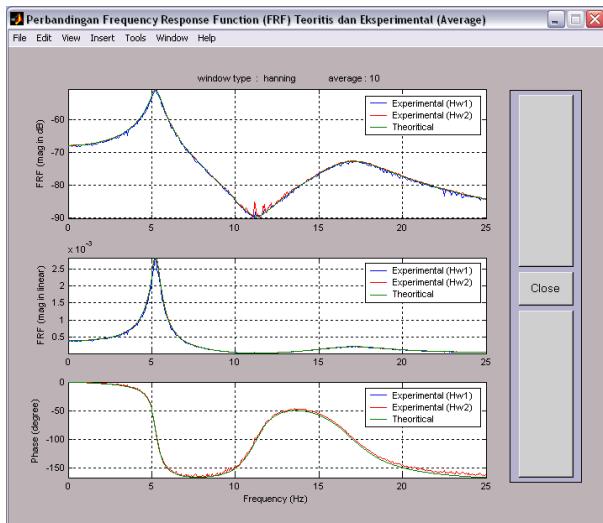


**Gambar 17**FRF setelah perata-rataan 10 kali

Dari Gambar 17 dan Gambar 18 tersebut, dapat dilihat bahwa harga FRF  $H_1(\omega)$  semakin bagus (kecuali pada daerah *antiresonansi*) setelah dilakukan perata-rataan sebanyak sepuluh kali.

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

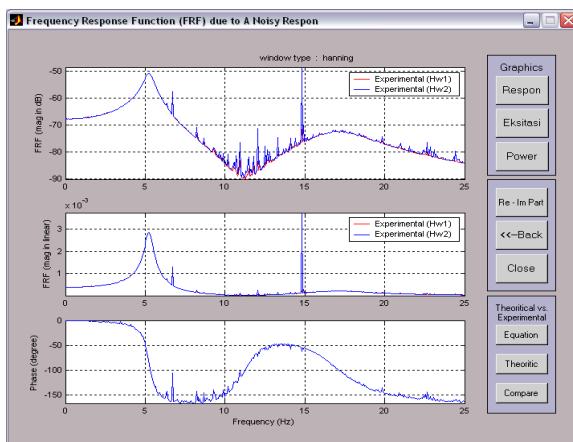
Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009



**Gambar 18** Perbandingan FRF teoritis dengan FRF simulasi eksperimen

Perbandingan FRF teoritis dan simulasi eksperimen dapat ditampilkan dengan menekan tombol *Compare*. Dari perbandingan ini dapat harga FRF simulasi eksperimen mendekati harga FRF teoritis (kecuali pada daerah *antiresonansi*), seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 18.

Dari grafik-grafik di atas dapat disimpulkan kehadiran sinyal pengganggu pada sinyal eksitasi menyebabkan FRF yang diperoleh menjadi tidak akurat. Harga FRF dapat diperbaiki dengan proses perata-rataan, kecuali harga FRF pada daerah resonansi. Ini dapat dilihat dari harga koherensi pada daerah *antiresonansi* tidak begitu bagus (belum mendekati satu) walaupun proses perata-rataan telah dilakukan beberapa kali.



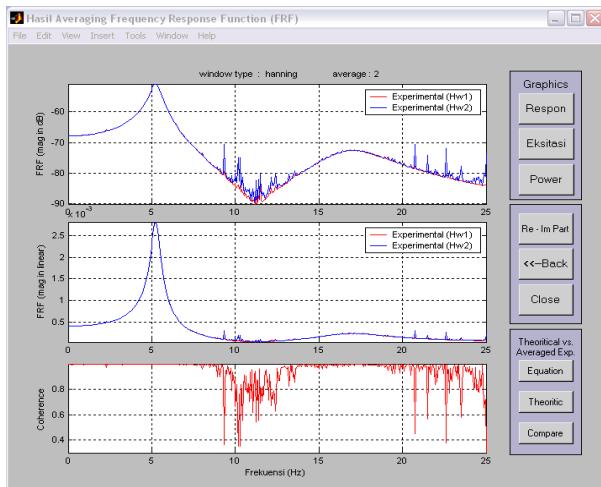
**Gambar 19** Diagram Bodé simulasi noise pada respon

Untuk simulasi sinyal pengganggu (noise) pada sinyal respon, sistem getaran yang digunakan sama dengan sistem sebelumnya. Sinyal pengganggu (noise) hanya terdapat pada sinyal respon. Grafik FRF simulasi eksperimen dengan sinyal respon yang mengandung sinyal pengganggu dapat ditampilkan dengan menekan tombol *Noise* dan tombol *Pada Respon*. Grafik FRF yang muncul setelah tombol-tombol tersebut ditekan ditunjukkan oleh Gambar 19.

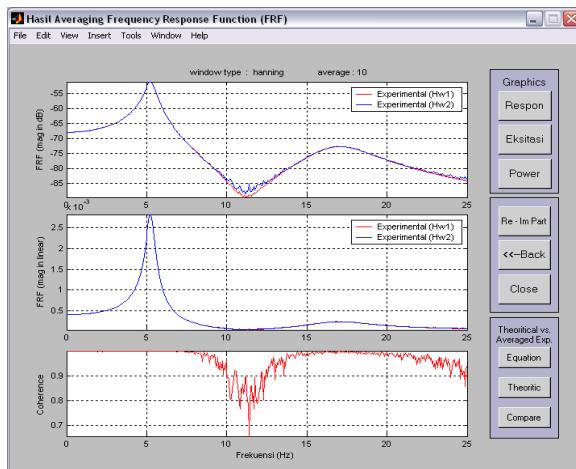
Hasil simulasi FRF setelah perata-rataan dan fungsi koherensi dari sistem getaran yang responnya mengandung sinyal pengganggu ditunjukkan oleh Gambar 20 dan Gambar 21.

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009



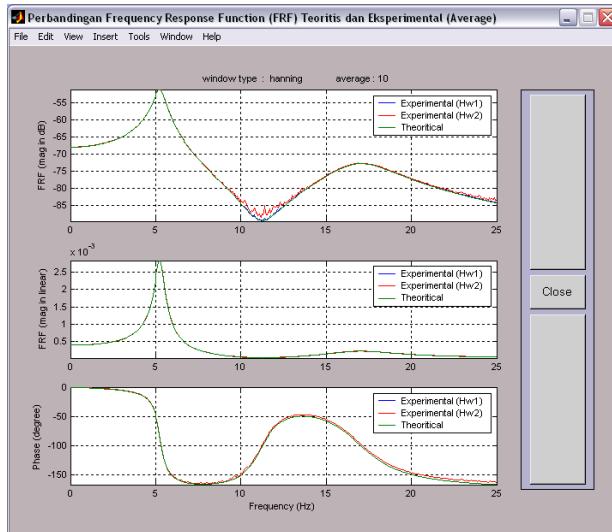
Gambar 20 FRF dengan perata-rataan 2 kali



Gambar 21 FRF dengan perata-rataan 10 kali

Proses perata-rataan bisa memperbaiki harga FRF  $H_2(\omega)$  untuk kasus sistem yang sinyal responnya mengandung sinyal pengganggu. Pengaruh perata-rataan terhadap harga FRF  $H_2(\omega)$  dapat dilihat dari grafik FRF simulasi eksperimen setelah perata-rataan sepuluh kali, hanya saja harga koherensi kurang begitu bagus pada bagian *antiresonansi*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 21. Kecuali pada daerah *antiresonansi*, harga koherensi cenderung mendekati satu setelah dilakukan perata-rataan (perbedaannya dapat dilihat dari Gambar 21 dan Gambar 22).

Perbandingan FRF teoritis dan simulasi eksperimen dapat ditampilkan dengan menekan tombol *Compare*. Dari perbandingan ini dapat dilihat harga FRF simulasi eksperimen mendekati harga FRF teoritis (kecuali pada daerah *antiresonansi*), seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 22.



**Gambar 22** Perbandingan FRF teoritis dengan FRF simulasi eksperimen

Dari Gambar 18 dan Gambar 22 dapat disimpulkan bahwa proses perata-rataan dapat mengurangi efek sinyal pengganggu (noise) pada FRF yang dihitung. Hanya saja harga FRF, terutama  $H_2(\omega)$ , pada daerah *antiresonansi* tidak cukup baik walaupun telah dilakukan perata-rataan. Hal ini disebabkan karena kekakuan dinamik sistem sangat besar pada daerah ini sehingga respon sistem bernilai kecil. Oleh karena itu, kedua FRF,  $H_1(\omega)$  dan  $H_2(\omega)$ , sangat dibutuhkan dan kedua harga ini saling memenuhi kekurangan satu sama lain. Pada daerah dekat resonansi, harga  $H_1(\omega)$  menjadi kurang baik bila dibandingkan dengan harga  $H_2(\omega)$ . Pada daerah *antiresonansi*, harga  $H_2(\omega)$  menjadi kurang baik bila dibandingkan dengan harga  $H_1(\omega)$ .

## 5. KESIMPULAN

Program simulasi pengujian ini dapat menampilkan hasil analisis getaran dari sistem diskrit, yaitu

- Respon getaran bebas dan paksa dalam domain waktu dan frekuensi.
- Fungsi Respon Frekuensi (FRF) teoritis dan simulasi eksperimen.
- FRF dan koherensi setelah perata-rataan.
- Fungsi korelasi.
- Fungsi Respon Impulse (IRF).
- Spektrum silang dan spektrum diri.
- Simulasi noise pada eksitasi.

Dengan adanya program simulasi ini sebagai alat bantu belajar diharapkan dapat membantu para pemula yang ingin mendalami bidang getaran eksperimental tanpa harus melakukan praktik pengujian sehingga waktu belajar menjadi singkat dan risiko kerusakan peralatan dapat dihindari. Para pemula dapat menggunakan program ini untuk mengetahui kegunaan berbagai parameter yang digunakan pada pengujian sebenarnya serta pengaruh parameter tersebut terhadap hasil pengujian.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rao, Singiresu S.: ‘Mechanical Vibration’, third edition, Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [2] Ewins, D. J.: ‘Modal Testing : Theory and Practice’, Research Studies Press Ltd., John Wiley & Sons, Inc., 1984.
- [3] McConnell, Kenneth G.: ‘Vibration Testing : Theory and Paractice’, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [4] James, M. L. Smith, G. M., Wolford, J. C., dan Whaley, P. W.: ‘Vibration of Mechanical and Structural Systems : With Microcomputer Applications’.
- [5] Proakis, John G. and Manolakis. Dimitris G.: ‘Digital Signal Processing’, second edition, Macmillan Publishing Company, 1992.
- [6] Shahian, B. dan Hassul, M.: ‘Control System Design Using Matlab<sup>®</sup>’, Prentice-Hall, Inc., 1993.