



## DEVELOPMENT OF SWEPT-SINE EXCITATION CONTROL METHOD TO MINIMIZE THE FRF MEASUREMENT ERROR

### PENGEMBANGAN METODE PENGONTROLAN EKSITASI SWEPT-SINE UNTUK MEMINIMALISASI KESALAHAN PENGUKURAN FRF

Asmara Yanto <sup>a,\*</sup>, Zainal Abidin <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri - ITP

Jl Gajah Mada Kandis Nanggalo, Padang, Indonesia

<sup>b</sup> Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara – ITB

Jl Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia

Received 31 May 2012; received in revised form 29 August 2012; accepted 31 August 2012

Published online 18 December 2012

#### Abstract

Shaker excitation in FRF (Frequency Response Function) measurement of a testing system can be controlled by using swept-sine signal source in a signal generator and it is called with swept-sine excitation. FRF's magnitude error of the system which is obtained from the FRF measurement using swept-sine excitation depends on swept function of swept-sine signal. In this paper, swept-sinesignals using linear and S535 swept functions have been simulated to controlling swept-sine excitation in the FRF measurement of SDOF (Single Degree of Freedom) system. Linear swept is swept function of swept-sine signal which is often used in the FRF measurement and S535swept is a swept function has been developed in this paper. Based on simulation results, the FRF's magnitude error at system's resonant frequency which was obtained from the FRF measurement using linear swept-sine excitation can be minimized by redoing the FRF measurement using S535 swept-sine excitation.

Key words: FRF, swept-sine, linear swept, S535 swept, magnitude.

#### Abstrak

Eksitasi shaker pada pengukuran FRF (Fungsi Respon Frekuensi) dari suatu sistem uji dapat dikontrol dengan sinyal swept-sine yang bersumber dari sebuah generator sinyal dan disebut dengan eksitasi swept-sine. Kesalahan magnitudo FRF sistem yang diperoleh dari pengukuran FRF dengan eksitasi swept-sine bergantung kepada fungsi swept dari sinyal swept-sine. Pada makalah ini, sinyal swept-sine dengan fungsi linear swept dan S535 swept telah disimulasikan untuk mengontrol eksitasi swept-sine pada pengukuran FRF Sistem 1-DK (Satu Derajat Kebebasan). Linear swept adalah fungsi swept dari sinyal swept-sine yang sering digunakan pada pengukuran FRF dan S535 swept adalah sebuah fungsi swept yang dikembangkan pada makalah ini. Berdasarkan hasil simulasi, kesalahan magnitudo FRF pada frekuensi resonansi sistem yang diperoleh dari pengukuran FRF dengan eksitasi linear swept-sine dapat diminimalisasi dengan mengulang kembali pengukuran FRF dengan eksitasi S535 swept-sine.

Kata kunci: FRF, swept-sine, linear swept, S535 swept, magnitudo.

## I. PENDAHULUAN

Pengukuran FRF (Fungsi Respon Frekuensi) dengan eksitasi shaker membutuhkan perangkat pengeksitasi yang terdiri atas generator sinyal, penguat daya, shaker, dan alat penghubung shaker ke sistem uji (stinger) [1-4]. Gaya eksitasi yang dihasilkan oleh shaker bersumber dari sinyal pengontrol eksitasi yang terdapat pada generator sinyal.

Salah satu dari beberapa sinyal pengontrol eksitasi yang sering digunakan pada pengukuran FRF adalah sinyal swept-sine. Sinyal swept-sine adalah sinyal sinusoidal dengan amplitudo tertentu dan memiliki kandungan frekuensi yang berubah terhadap waktu [4-6]. Fungsi yang mengekspresikan hubungan frekuensi sinyal swept-sine terhadap waktu disebut dengan fungsi swept dan parameter yang menyatakan laju perubahan frekuensi sinyal swept-sine disebut dengan swept rate. Harga swept rate bergantung

\* Corresponding Author. Tel: +62-751-443317

E-mail: asmarayanto@yahoo.com

kepada *span* frekuensi dan waktu *swept* pada fungsi *swept*. Gaya eksitasi yang dihasilkan oleh *shaker* dengan cara mengontrolnya dengan menggunakan sinyal *swept-sine* disebut dengan eksitasi *swept-sine*. Magnitudo FRF sistem uji yang diperoleh dari pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine* disebut dengan magnitudo FRF *swept-sine*.

Beberapa metode eksitasi *swept-sine* pada pengukuran FRF secara MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) dapat dilihat pada referensi [7-13]. Berdasarkan referensi ini, eksitasi *swept-sine* diterapkan kepada sistem uji dengan menggunakan beberapa *shaker*. Setiap *shaker* menghasilkan eksitasi *swept-sine* dengan *swept rate* yang berbeda satu sama lain. Untuk memperoleh magnitudo FRF yang teliti pada frekuensi resonansi sistem yang terendah, sekurang-kurangnya satu dari beberapa eksitasi *swept-sine* yang diterapkan tersebut harus mengandung *swept rate* yang lambat.

Pembahasan mengenai pengaruh harga *swept rate* pada pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine* secara SISO (*Single Input Single Output*) dapat dilihat pada referensi [14-15]. Berdasarkan referensi ini, eksitasi *swept sine* pada pengukuran FRF sistem uji akan menghasilkan magnitudo FRF yang teliti pada frekuensi resonansi sistem apabila memiliki *swept rate* yang lambat. Tetapi, cara ini membutuhkan waktu *swept* yang panjang dan menghasilkan jumlah data yang banyak.

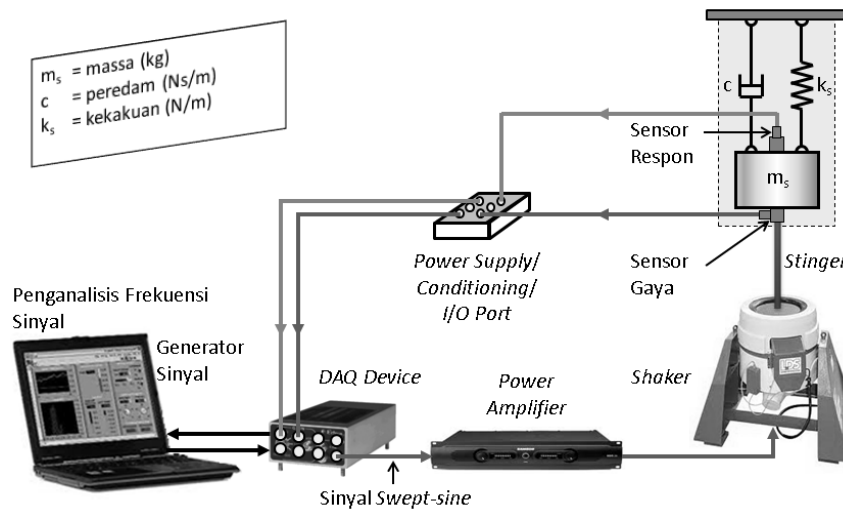
Berdasarkan referensi [7-15], pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine* yang memiliki *swept rate* yang semakin cepat menghasilkan magnitudo FRF pada frekuensi resonansi sistem dengan kesalahan yang semakin besar. Oleh karena itu, pada makalah ini dikembangkan suatu

metode untuk meminimalisasi kesalahan magnitudo FRF yang diperoleh dari pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine* yang memiliki *swept rate* yang cepat. Eksitasi *swept-sine* untuk *span* frekuensi dan waktu *swept* tertentu yang semula dikontrol dengan sinyal *linear swept-sine*, dikontrol kembali dengan sinyal *S535 swept-sine*. *Span* frekuensi dan waktu *swept* pada eksitasi *S535 swept-sine* dipertahankan sama dengan *span* frekuensi dan waktu *swept* pada eksitasi *linear swept-sine*.

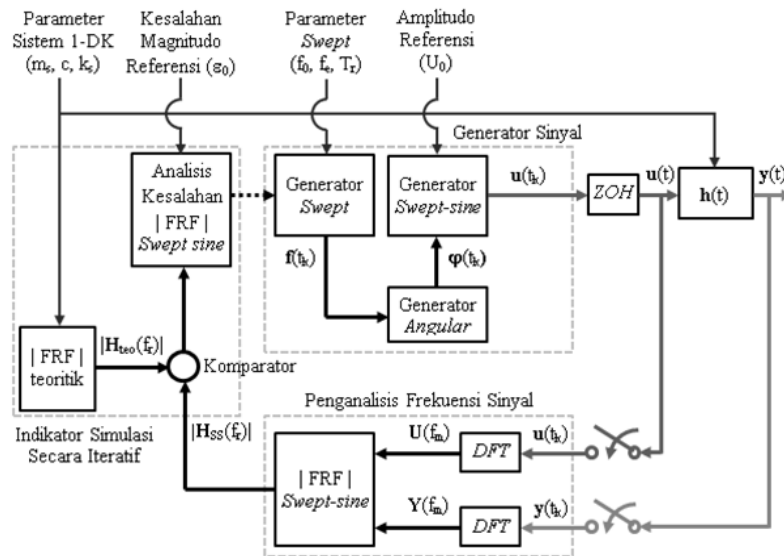
Sinyal *S535 swept-sine* terdiri atas tiga fungsi *swept* yang saling menyambung untuk memenuhi *span* frekuensi eksitasi. Fungsi *swept* pertama adalah *swept* polinomial orde-5 untuk frekuensi eksitasi di bawah daerah frekuensi resonansi sistem, fungsi *swept* kedua adalah *swept* polinomial orde-3 untuk frekuensi eksitasi disekitar frekuensi resonansi sistem, dan fungsi *swept* ketiga adalah *swept* polinomial orde-5 untuk frekuensi eksitasi di atas daerah frekuensi resonansi sistem. Eksitasi *swept-sine* yang dikontrol dengan sinyal *linear swept-sine* dan *S535 swept-sine* disimulasikan secara numeric pada pengukuran FRF Sistem 1-DK (Satu Derajat Kebebasan). Ketelitian magnitudo FRF sistem yang dihasilkan berdasarkan harga kesalahan magnitudo FRF *swept-sine* terhadap magnitudo FRF teoritik di frekuensi resonansi sistem.

## II. METODOLOGI

Skema pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine* ditunjukkan oleh Gambar 1. Sedangkan model simulasi pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine* ditunjukkan oleh Gambar 2. Simulasi pengontrolan eksitasi *swept-sine* pada pengukuran FRF diawali dengan proses penentuan magnitudo FRF teoritik Sistem 1-DK



Gambar 1. Skema pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine*.



Gambar 2. Model simulasi pengukuran FRF dengan eksitasi *swept sine* secara iteratif.

dengan parameter masukan sistem berupa massa,  $m_s$  (kg), peredam,  $c$  (Ns/m), dan kekakuan,  $k_s$  (N/m). Pada proses ini, harga frekuensi pribadi,  $f_n$ (Hz), dan rasio redaman,  $\zeta$ , dihitung terlebih dahulu masing-masing dengan:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} \tag{1}$$

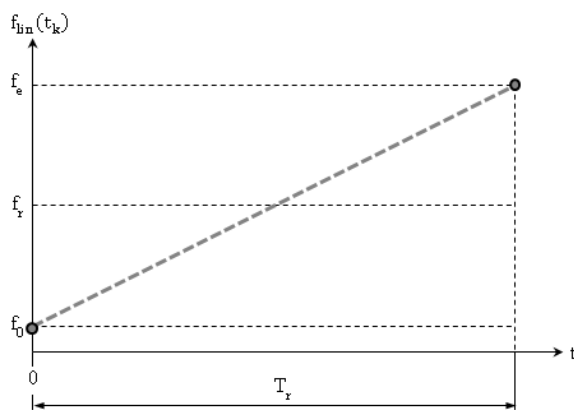
$$\zeta = \frac{c}{4\pi m_s f_n} \tag{2}$$

Magnitudo FRF teoritik Sistem 1-DK,  $|H_{teo}(f)|$  (m/N), diperoleh dengan

$$|H_{teo}(f)| = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{f}{f_n})^2]^2 + (2\zeta \frac{f}{f_n})^2}} \tag{3}$$

Frekuensi resonansi,  $f_r$ (Hz), diperoleh dari kurva  $|H_{teo}(f)|$  di mana  $f_r$  adalah frekuensi pada harga maksimum dari  $|H_{teo}(f)|$ .

Proses selanjutnya adalah analisis kesalahan magnitudo FRF *swept-sine*. Perbedaan magnitudo FRF teoritik pada  $f_r$ ,  $|H_{teo}(f_r)|$ , dengan magnitudo FRF *swept-sine* pada  $f_r$ ,  $|H_{ss}(f_r)|$ , yang merupakan keluaran dari komparator dan kesalahan



Gambar 3. Fungsi  $f_{in}(t_k)$  dengan dua buah kondisi batas.

magnitudo referensi,  $\epsilon_0$  (%), merupakan masukan pada proses ini. Persentase kesalahan  $|H_{ss}(f_r)|$  yang dinotasikan dengan  $\epsilon_\alpha(f_r)$  diekpresikan dengan:

$$\epsilon_\alpha(f_r) = \frac{|H_{teo}(f_r)| - |H_{ss}(f_r)|}{|H_{teo}(f_r)|} 100\% \tag{4}$$

Pada inisiasi simulasi,  $|H_{ss}(f_r)| = 0$  sehingga harga  $\epsilon_\alpha(f_r) = 100\%$ . Harga  $(\epsilon_\alpha(f_r)/\epsilon_0) > 1$  merupakan indikator untuk proses simulasi pengontrolan eksitasi *swept-sine* pada pengukuran FRF secara iteratif.

### A. Fungsi Swept

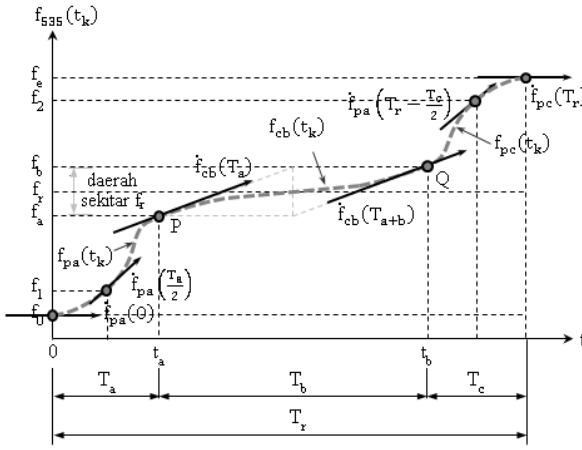
Pengontrolan eksitasi *swept-sine* berawal dari proses di generator *swept*. Pada proses ini, parameter masukan adalah parameter *swept* berupa frekuensi awal,  $f_0$  (Hz), frekuensi akhir,  $f_e$  (Hz), dan lama eksitasi atau waktu *swept*,  $T_r$  (s). Generator *swept* menghasilkan keluaran berupa fungsi *swept*,  $f(t_k)$ . Fungsi *swept* merupakan fungsi pengontrol frekuensi sinyal *swept-sine*.

Fungsi *swept* pada iterasi yang pertama adalah fungsi *linear swept* seperti pada Gambar 3. Fungsi ini dinotasikan dengan  $f_{in}(t_k)$ . Fungsi  $f_{in}(t_k)$  memiliki dua buah kondisi batas, yaitu:  $f_{in}(0) = f_0$  dan  $f_{in}(T_r) = f_e$ . Fungsi *swept* dengan  $f_{in}(t_k)$  diekpresikan dengan:

$$f(t_k) = f_{in}(t_k) = (f_e - f_0) \left(\frac{t_k}{T_r}\right) + f_0; \tag{5}$$

$$0 \leq t_k \leq T_r$$

Fungsi *swept* pada iterasi ke-2 dan berikutnya hingga diperoleh harga  $(\epsilon_\alpha(f_r)/\epsilon_0) \leq 1$  adalah fungsi *S535 swept* yang dinotasikan dengan  $f_{535}(t_k)$ (Hz). Fungsi ini disusun oleh tiga buah



Gambar 4. Fungsi  $f_{535}(t_k)$  dengan tiga fungsi swept penyusunnya.

fungsi *swept* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4 dan diekspresikan dengan:

$$f(t_k) = f_{535}(t_k) = \begin{cases} f_{pa}(t_k); & 0 \leq t_k < T_a \\ f_{cb}(t_k); & T_a \leq t_k < (T_a + T_b) \\ f_{pc}(t_k); & (T_a + T_b) \leq t_k \leq T_r \end{cases} \quad (6)$$

Fungsi-fungsi *swept* yang menyusun  $f_{535}(t_k)$  adalah sebagai berikut:

1. Fungsi  $f_{pa}(t_k)$  (Hz) dengan enam buah kondisi batas, yaitu:

$$f_{pa}(0) = f_0$$

$$\dot{f}_{pa}(0) = 0$$

$$f_{pa}\left(\frac{T_a}{2}\right) = f_1 = f_0 + \frac{(f_a - f_0)}{4}$$

$$\dot{f}_{pa}\left(\frac{T_a}{2}\right) = \frac{(f_a - f_0)}{T_a}$$

$$f_{pa}(T_a) = f_a$$

$$\dot{f}_{pa}(T_a) = 2 \frac{(f_b - f_a)}{T_b}$$

Fungsi  $f_{pa}(t_k)$  adalah fungsi *swept* untuk frekuensi eksitasi *swept-sine* di bawah daerah frekuensi resonansi sistem.

$$f_{pa}(t_k) = \left\{ (f_a - f_0) \left[ -8 \left( \frac{t_k}{T_a} \right)^3 + 16tkTa^2 - 10tkTa + 3 + 2fb - faTaTb4tkTa^3 - 8tkTa^2 + 5tkTa - 1tkTa^2 + f_0 \right] \right\} \quad (7)$$

2. Fungsi  $f_{cb}(t_k)$  (Hz) dengan empat kondisi batas, yaitu:

$$f_{cb}(T_a) = f_a$$

$$\dot{f}_{cb}(T_a) = 2 \frac{(f_b - f_a)}{T_b}$$

$$f_{cb}(T_{a+b}) = f_b; \quad T_{a+b} = T_a + T_b$$

$$\dot{f}_{cb}(T_a + T_b) = 2 \frac{(f_b - f_a)}{T_b}$$

Fungsi  $f_{cb}(t_k)$  adalah fungsi *swept* untuk frekuensi eksitasi *swept-sine* di sekitar frekuensi resonansi sistem.

$$f_{cb}(t_k) = (f_b - f_a) \left[ 2 \left( \frac{t_k - T_a}{T_b} \right)^2 - 3tk - TaTb + 2tk - TaTb + fa \right] \quad (8)$$

3. Fungsi  $f_{pc}(t_k)$  (Hz) dengan enam buah kondisi batas, yaitu:

$$f_{pc}(T_{a+b}) = f_b$$

$$\dot{f}_{pc}(T_{a+b}) = 2 \frac{(f_b - f_a)}{T_b}$$

$$f_{pc}\left(T_e - \frac{T_c}{2}\right) = f_2 = f_e - \frac{(f_e - f_b)}{4}$$

$$\dot{f}_{pc}\left(T_e - \frac{T_c}{2}\right) = \frac{(f_e - f_b)}{T_c}$$

$$f_{pc}(T_e) = f_e$$

$$\dot{f}_{pc}(T_e) = 0.$$

Fungsi  $f_{pd}(t_k)$  adalah fungsi *swept* untuk frekuensi eksitasi *swept-sine* di atas daerah frekuensi resonansi sistem.

$$f_{pc}(t_k) = \left\{ (f_e - f_b) \left[ -8 \left( \frac{t_k - T_{a+b}}{T_c} \right)^4 + 24tk - Ta + bTc^3 - 26tk - Ta + bTc^2 + 11tk - Ta + bTc + 2fb - faTcTb4tk - Ta + bTc^4 - 12tk - Ta + bTc^3 + 13tk - Ta + bTc^2 - 6tk - Ta + bTc + 1tk - Ta + bTc + fb \right] \right\} \quad (9)$$

*Swept rate* rata-rata dari fungsi  $f(t_k)$  yang dinotasikan dengan  $\bar{r}_f$  (Hz/s) adalah

$$\bar{r}_f = \frac{f_e - f_0}{T_r} \quad (10)$$

dan interval waktu,  $\Delta t$  (s), antara dua buah data  $f(t_k)$  bergantung kepada laju pencuplikan data,  $S_r$  (Sample/s), pada perangkat pengakuisisi data (DAQ Device).

$$\Delta t = \frac{1}{S_r} \quad (11)$$

**B. Eksitasi Swept-Sine**

Fungsi  $\varphi(t_k)$  diproses oleh generator *angular* sehingga diperoleh *angular*,  $\varphi(t_k)$  (rad). Fungsi  $\varphi(t_k)$  di ekspresikan dengan

$$\varphi(t_k) = 2\pi \int_0^{t_k} [f(t)]dt ; 0 \leq t_k \leq T_r \quad (12)$$

Selanjutnya eksitasi *swept-sine* dihasilkan oleh generator sinyal *swept-sine* dengan  $\varphi(t_k)$  dan amplitudo referensi,  $U_0$  (N), sebagai masukan. Fungsi eksitasi *swept-sine*,  $u(t_k)$  (N), diekspresikan dengan

$$u(t_k) = U_0 \sin[\varphi(t_k)] ; 0 \leq t_k \leq T_r \quad (13)$$

**C. Respon Sistem**

Model hubungan  $u(t_k)$  dengan respon sistem,  $y(t_k)$  m, ditunjukkan oleh diagram blok pada Gambar 5. Pada Gambar 5, fungsi yang menghubungkan  $u(t)$  dengan  $y(t)$  yang dinotasikan dengan  $h(t)$  merupakan FRI (Fungsi Respon Impuls) dari Sistem 1-DK. Diagram blok dari FRI ini dapat dilihat pada Gambar 6 [16].

Keadaan dan persamaan keluaran sistem pada Gambar 6 dengan metode ruang-keadaan (*state-space*) masing-masing diekspresikan dengan Persamaan (14) dan (15) [17].

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c}{m_s} \end{bmatrix} \begin{cases} x_1 \\ x_2 \end{cases} + \begin{cases} 0 \\ \frac{1}{m_s} \end{cases} u$$

$$\dot{x} = [A]\{x\} + \{B\}u \quad (14)$$

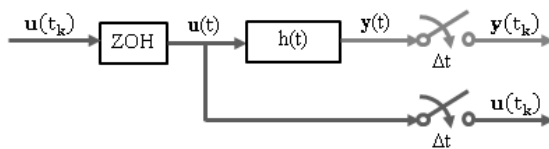
$$y = [1 \quad 0] \begin{cases} x_1 \\ x_2 \end{cases}$$

$$y = [C]\{x\} \quad (15)$$

dimana  $\{x\}$ ,  $y$ ,  $u$ ,  $[A]$ ,  $\{B\}$ , dan  $[C]$  secara berturut-turut adalah vektor keadaan, vektor keluaran, vektor masukan, matriks keadaan, matriks masukan, dan matriks keluaran.

Diskritisasi Persamaan (14) dan (15) meyajikan keadaan dan persamaan keluaran sistem dalam waktu diskrit secara berturut-turut dengan Persamaan (16) dan (17) [16].

$$\begin{cases} x_1((k+1)\Delta t) \\ x_2((k+1)\Delta t) \end{cases} = [G] \begin{cases} x_1(k\Delta t) \\ x_2(k\Delta t) \end{cases} + \{H\}u(k\Delta t) \quad (16)$$



Gambar 5. Model hubungan antara  $u(t_k)$  dengan  $y(t_k)$ .

$$y(k\Delta t) = [C] \begin{cases} x_1(k\Delta t) \\ x_2(k\Delta t) \end{cases} \quad (17)$$

dimana,

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

$$G = L^{-1} \left[ \left( \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} - [A] \right)^{-1} \right]$$

$$H = \left( \int_0^{\Delta t} e^{[A]t} dt \right) \{B\}$$

dengan  $s$  adalah variabel kompleks.

Matriks  $[G]$  dan  $\{H\}$  pada Persamaan (16) adalah matriks keadaan dan matriks masukan waktu diskrit yang secara berturut-turut dinyatakan dengan Persamaan (18) dan (19).

$$G = \frac{e^{-a\Delta t} - e^{-b\Delta t}}{b-a} \begin{bmatrix} 2\zeta\omega_n - E & 1 \\ -\omega_n^2 & -E \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$H = \frac{1}{m_s(b-a)} \begin{cases} -\frac{1}{a}(e^{-a\Delta t} - 1) + \frac{1}{b}(e^{-b\Delta t} - 1) \\ e^{-a\Delta t} - e^{-b\Delta t} \end{cases} \quad (19)$$

dimana,

$$E = \frac{ae^{-a\Delta t} - be^{-b\Delta t}}{e^{-a\Delta t} - e^{-b\Delta t}}$$

$$a = \zeta\omega_n + i\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

$$b = \zeta\omega_n - i\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

$$\omega_n = 2\pi f_n$$

dengan  $\{x\}$  pada kondisi awal adalah

$$\begin{cases} x_1(0) \\ x_2(0) \end{cases} = \begin{cases} 0 \\ 0 \end{cases}$$

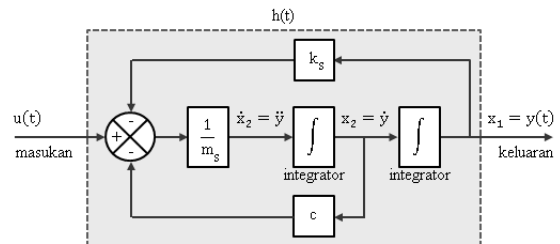
dan  $C = [1 \quad 0]$ , keadaan  $\{x(t_k)\}$  dan persamaan keluaran  $y(t_k)$  diperoleh dengan

$$\begin{cases} x_1(t_{k+1}) \\ x_2(t_{k+1}) \end{cases} = [G] \begin{cases} x_1(t_k) \\ x_2(t_k) \end{cases} + \{H\}u(t_k) \quad (20)$$

$$y(t_k) = x_1(t_k) ; 0 \leq t_k \leq T_r \quad (21)$$

**D. FRF Sistem**

Data pengukuran terhadap  $u(t_k)$  dan  $y(t_k)$  merupakan data-data diskrit dalam domain waktu. Dengan mentransformasinya ke dalam domain frekuensi, kandungan frekuensi dari  $u(t_k)$  dan



Gambar 6. Diagram blok FRI (Fungsi Respon Impuls) Sistem-1DK.

$y(t_k)$  dapat diketahui. Transformasi data-data diskrit dalam domain waktu menjadi domain frekuensi dilakukan dengan menggunakan transformasi Fourier diskrit (*Discrete Fourier Transform* atau DFT) [18]. DFT terhadap  $u(t_k)$  dan  $y(t_k)$  menghasilkan koefisien  $Du_m$  dan  $Dy_m$  secara berturut-turut pada Persamaan (22) dan (23).

$$Du_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(t_k) e^{-i2\pi \frac{m_s k_s}{N}} \quad (22)$$

$$Dy_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(t_k) e^{-i2\pi \frac{m_s k_s}{N}} \quad (23)$$

dimana  $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$  dan  $N$  adalah jumlah  $d$  atau  $(t_k)$  atau  $y(t_k)$ .

Koefisien  $Du_m$  dan  $Dy_m$  berada pada domain frekuensi  $f_m$  yang diperoleh dengan

$$f_m = \frac{m}{T_r}; m = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (24)$$

Spektrum frekuensi dari  $u(t_k)$  yang dinotasikan dengan  $U(f_m)$  dan spektrum frekuensi dari  $y(t_k)$  yang dinotasikan dengan  $Y(f_m)$  diekspresikan dengan

$$U(f_m) = Du_m \quad (25)$$

$$Y(f_m) = Dy_m \quad (26)$$

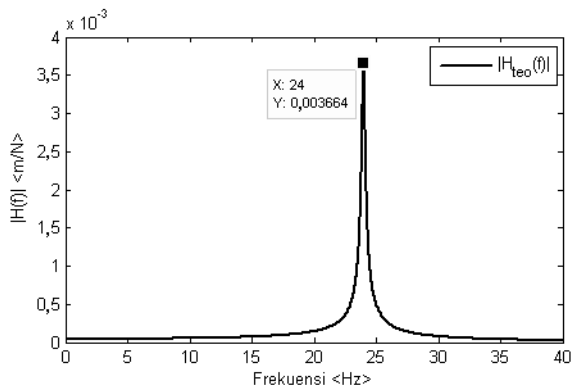
FRF sistem dengan eksitasi *swept-sine* adalah rasio  $Y(f_m)$  terhadap  $U(f_m)$ . FRF yang diperoleh pada pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine* disebut dengan FRF *swept-sine*,  $H_{SS}(f_m)$ , yang diekspresikan dengan

$$H_{SS}(f_m) = \frac{Y(f_m)}{U(f_m)} \quad (27)$$

Magnitudo FRF *swept-sine*,  $|H_{SS}(f_m)|$  (m/N), diperoleh dengan

$$|H_{SS}(f_m)| = \sqrt{\{Re[H_{SS}(f_m)]\}^2 + \{Im[H_{SS}(f_m)]\}^2} \quad (28)$$

dimana  $Re[H_{SS}(f_m)]$  dan  $Im[H_{SS}(f_m)]$  masing-masing adalah bagian *real* dan *imaginer* dari  $H_{SS}(f_m)$ .



Gambar 7. Kurva  $|H_{teo}(f)|$  yang diperoleh dari simulasi.

Tabel 1

Data-data masukan simulasi.

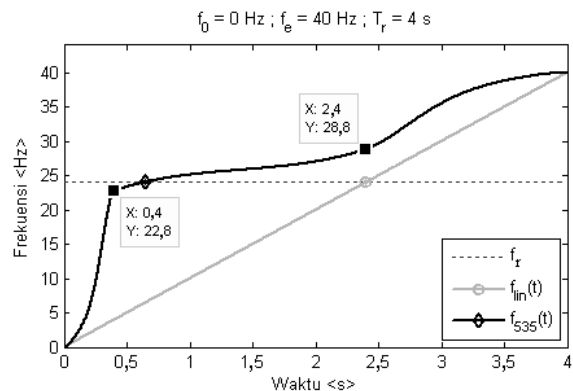
Parameter	Harga (satuan)
Massa, $m_s$	1 (kg)
Peredam, $c$	1,81(Ns/m)
Kekakuan, $k_s$	22.739,57(N/m)
Kesalahan magnitudo referensi, $\varepsilon_0$	5 (%)
Frekuensi awal, $f_0$	0 (Hz)
Frekuensi akhir, $f_e$	40 (Hz)
Lama eksitasi, $T_r$	4 (s)
Amplitudo referensi, $U_0$	1 (N)
Laju pencuplikan, $S_r$	1600 (Sample/s)

### E. Data-data Simulasi

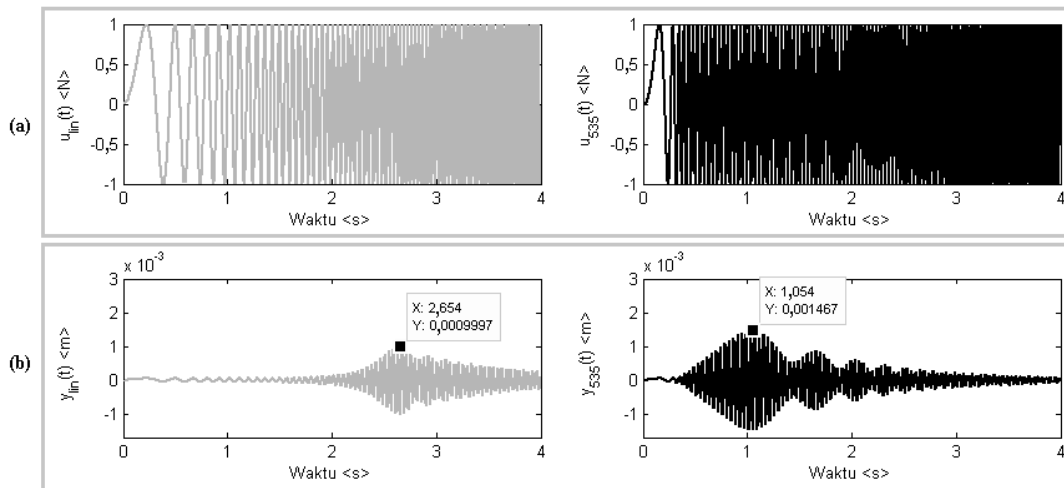
Simulasi pengontrolan eksitasi *swept sine* terhadap Sistem 1-DK dilakukan secara numerik dengan data-data masukan simulasi pada Tabel 1. Penentuan posisi dua titik pertemuan antara dua fungsi *swept* yaitu titik  $P(T_a, f_a)$  dan titik  $Q(T_a+T_b, f_b)$  pada fungsi  $f_{535}(t_k)$  ditentukan secara iteratif. Harga  $T_a$  divariasikan dari  $0,05T_r$  hingga  $0,20T_r$  dengan kenaikan  $0,05T_r$ , harga  $T_b$  divariasikan dari  $0,60T_r$  sampai  $0,95T_r-T_a$  dengan kenaikan  $0,05T_r$ , harga  $f_a$  divariasikan dari  $0,80f_r$  hingga  $0,95f_r$  dengan kenaikan  $0,05f_r$ , dan harga  $f_b$  divariasikan dari  $1,05f_r$  hingga  $1,20f_r$  dengan kenaikan  $0,05f_r$ .

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kurva  $|H_{teo}(f)|$  yang diperoleh dari simulasi ditunjukkan oleh Gambar 7. Dari kurva  $|H_{teo}(f)|$  diperoleh frekuensi resonansi teoritik,  $f_r = 24$  Hz, dengan harga  $|H_{teo}(f_r)| = 3,664 \times 10^{-3}$  m/N. *Linear swept* dan *S535 swept* yang diperoleh melalui simulasi secara iteratif ditunjukkan pada Gambar 8. *Swept rate* dari *linear swept* adalah 10 Hz/s. Harga *swept rate* ini digunakan kembali oleh *S535 swept* menjadi *swept rate* rata-rata. Parameter *S535 swept* selain  $f_0$ ,  $f_e$ , dan  $T_r$  yang diperoleh secara iteratif untuk menghasilkan  $|H_{SS}(f_r)|$  dengan  $(\varepsilon_a(f_r)/\varepsilon_0) \leq 1$  dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 8. Fungsi linear *swept* dan *S535 swept* yang diperoleh melalui simulasi secara iteratif.



Gambar 9. Gaya eksitasi swept-sine dan respon sistem; (a) Perbandingan gaya eksitasi  $u_{lin}(t)$  dengan  $u_{535}(t)$ ; (b) Perbandingan respon  $y_{lin}(t)$  dengan  $y_{535}(t)$ .

Perbandingan eksitasi *linear swept-sine*,  $u_{lin}(t)$ , dengan eksitasi *S535 swept-sine*,  $u_{535}(t)$ , ditunjukkan oleh Gambar 9(a). Kandungan frekuensi eksitasi *S535 swept-sine* di sekitar frekuensi resonansi sistem memiliki alokasi waktu yang lebih lama jika dibandingkan dengan eksitasi *linear swept-sine* sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 8. Eksitasi *S535 swept-sine* di sekitar frekuensi resonansi memiliki *swept rate* yang lambat atau berlangsung lebih lama sehingga menghasilkan respon sistem maksimum dengan amplitudo  $14,670 \times 10^{-4}$  m. Sedangkan respon sistem maksimum terhadap eksitasi *linear swept-sine* mempunyai amplitudo sebesar  $9,997 \times 10^{-4}$  m sebagaimana yang ditunjukkan Gambar 9(b).

Selain itu, dengan eksitasi *S535 swept-sine*, pengaruh respon *transient* di sekitar frekuensi resonansi hanya sedikit dan didominasi oleh respon *steady-state*. Respon *steady-state* ini sangat mempengaruhi FRF sistem karena FRF merupakan fungsi perbesaran respon *steady-state*

pada setiap frekuensi eksitasi [19].

Kurva  $|H_{lin}(f)|$  dan  $|H_{535}(f)|$  yang masing-masing dihasilkan pada simulasi pengukuran FRF Sistem 1-DK dengan ekitasi *linear swept-sine* dan *S535 swept-sine* memperlihatkan frekuensi resonansi sistem yang tetap sama dengan harga teoritiknyanya yaitu  $f_r = 24$  Hz. Harga  $|H_{lin}(f)|$  dan  $|H_{535}(f)|$  di  $f_r$  menunjukkan perbedaan yang signifikan dimana harga kesalahan  $|H_{lin}(f_r)|$  terhadap  $|H_{teo}(f_r)|$  lebih besar jika dibandingkan dengan harga kesalahan  $|H_{535}(f_r)|$  terhadap  $|H_{teo}(f_r)|$ . Harga kesalahan  $|H_{lin}(f_r)|$  dan  $|H_{535}(f_r)|$  terhadap  $|H_{teo}(f_r)|$  dapat dilihat pada Tabel 3.

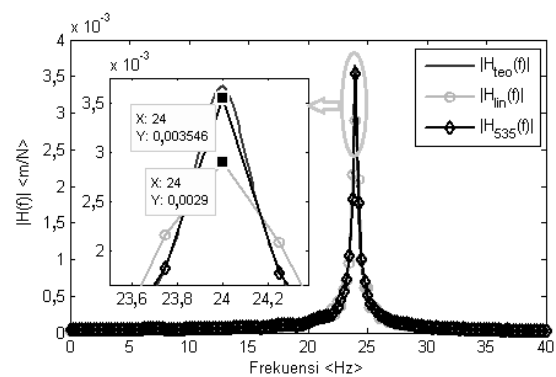
Dengan demikian, pengontrolan kembali eksitasi *swept-sine* dengan sinyal *S535 swept-sine* mampu meminimalisasi kesalahan magnitudo FRF yang diperoleh dari pengontrolan eksitasi *swept-sine* yang sebelumnya dengan sinyal *linear swept-sine*. Selain itu, batas kesalahan magnitudo referensi sebesar 5% yang diinginkan dapat terpenuhi dengan pengontrolan eksitasi *swept-sine* dengan sinyal *S535 swept-sine*.

Tabel 2  
Parameter *S535 swept* selain  $f_0$ ,  $f_e$ , dan  $T_r$  yang diperoleh secara iteratif.

Parameter	Harga (satuan)
Frekuensi di bawah $f_r$ , $f_a$	22,8 (Hz)
Frekuensi di atas $f_r$ , $f_b$	28,8 (Hz)
Waktu saat $f = f_a$ , $t_a$	0,4 (s)
Waktu saat $f = f_b$ , $t_b$	2,4 (s)

Tabel 3  
Perbedaan harga  $|H_{lin}(f)|$  dan  $|H_{535}(f)|$  terhadap  $|H_{teo}(f)|$  di  $f_r$ .

$ H(f) $	$ H(f_r) (m/N)$	$\epsilon_a(f_r)$ (%)
$ H_{teo}(f) $	$3,664 \times 10^{-3}$	-
$ H_{lin}(f) $	$2,900 \times 10^{-3}$	20,86
$ H_{535}(f) $	$3,546 \times 10^{-3}$	3,22



Gambar 10. Perbandingan  $|H_{lin}(f)|$  dan  $|H_{535}(f)|$  terhadap  $|H_{teo}(f)|$ .

#### IV. KESIMPULAN

Pengukuran FRF Sistem 1-DK dengan  $m_s=1$  kg,  $c = 1,81$  Ns/m, dan  $k_s = 22.739,57$  N/m secara simulasi dengan mengontrol eksitasi *swept-sine* yang diterapkan ke sistem dengan sinyal *linear swept-sine* menghasilkan kesalahan magnitude FRF di  $f_r$  sebesar 20,86 % untuk *span* frekuensi dari  $f_0 = 0$  Hz sampai  $f_c = 40$  Hz dan waktu *swept*  $T_r = 4$  s. Kesalahan ini dapat diminimalisasi sehingga menjadi 3,22% dengan mengontrol kembali eksitasi *swept-sine* dengan menggunakan sinyal *S535 swept-sine* meskipun dengan *span* frekuensi dan waktu *swept* yang sama pada sinyal *linear swept-sine*.

Berdasarkan hasil simulasi pengontrolan eksitasi *swept-sine* pada makalah ini, sinyal *S535 swept-sine* dapat diusulkan sebagai sinyal untuk mengontrol eksitasi *swept-sine* pada pengukuran FRF sistem nyata secara eksperimental.

#### REFERENSI

- [1] M. A. Peres, et al., "Practical Aspects of Shaker Measurements for Modal Testing," in *Proc. of ISMA 2010*, 2010, pp. 2539-2551.
- [2] D. Cloutier, et al., "Shaker/Stringer Effect on Measured Frequency Response Functions," *presented at the 27th International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, 2009.
- [3] U. Füllekrug, et al., "Measurement of FRFs and Modal Identification in Case of Correlated Multi-Point Excitation," *Shock and Vibration*, vol. 15, pp. 435-445, 2008.
- [4] K. G. McConnell, *Vibration Testing: Theory and Practice*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1995.
- [5] N. Haritos, "Swept Sine Wave Testing of Compliant Bottom-Pivoted Cylinders," in *Proceedings of the First (1991) International Offshore and Polar Engineering Conference* Edinburgh, United Kingdom, 1991.
- [6] J. Zhuge, *Advanced Dynamic Signal Analysis*. Santa Clara: Crystal Instruments Corporation, 2009.
- [7] P. Giclais, et al., "New Excitation Signals for Aircraft Ground Vibration Testing," *presented at the International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics 2011*, Munich, 2011.
- [8] K. Napolitano and D. Linehan, "Multiple Sine Sweep Excitation for Ground Test," *presented at the 27th International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, 2009.
- [9] B. Peeters, et al., "Modern Solutions for Ground Vibration Testing of Large Aircraft," *presented at the 26th International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, 2008.
- [10] S. Orlando, et al., "Improved FRF estimators for MIMO Sine Sweep Data," in *Proceedings of the ISMA 2008 International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Katholieke Universiteit, Leuven, 2008, pp. 229-241.
- [11] H. Climent, "Aeroelastic and Structural Dynamics Tests at EADS CASA," in *Proc. of the 18th Annual Symposium of the Society of Flight Test Engineers SFTE*, Madrid, 2007.
- [12] D. Göge, et al., "Ground Vibration Testing of Large Aircraft – State-of-the-Art and Future Perspectives," *presented at the 25th International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, 2007.
- [13] S. Pauwels, et al., "A New MIMO Sine Testing Technique for Accelerated, High Quality FRF Measurements," *presented at the 24<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference*, St. Louis, MO, 2006.
- [14] G. Gloth and M. Sinapsis, "Analysis of Swept-Sine Runs During Modal Identification," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, pp. 1421-1441, 2004.
- [15] M. Sinapius and G. Gloth, "Influence and Characterisation of Weak Non-Linearities in Swept-Sine Modal Testing," *Aerospace Science and Technology*, vol. 8, pp. 111-120, 2004.
- [16] K. Ogata, *Discrete-Time Control Systems*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1995.
- [17] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 2002.
- [18] E. Kreyszig, *Advanced Engineering Mathematics* 9th Edition, 9 ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2006.
- [19] R. K. Mobley, *Vibration Fundamentals (Plant Engineering Maintenance (Hardback))*. Boston: Butterworth-Heinemann, 1999.