

M7-004 PENGARUH KETERBATASAN WAKTU REKAM TERHADAP KESALAHAN MAGNITUD FUNGSI RESPON FREKUENSI (FRF) PADA SISTEM GETARAN DUA DERAJAT KEBEBASAN

Dedi Suryadi¹, Zainal Abidin²

(1) Staf Pengajar Program Studi Teknik Mesin, Universitas Bengkulu

(2) Staf Pengajar Departement Teknik Mesin ITB

Jl. Raya Kandang Limun, Bengkulu. Telp. (0736) 21170

Email : dedisuryadi_sy@yahoo.com

Abstrak

Pengujian getaran bertujuan untuk mengetahui karakteristik dinamik dari suatu sistem. Terdapat tiga buah karakteristik dinamik dari suatu sistem yaitu frekuensi fribadi, rasio redaman, dan modus getar. Informasi ketiga karakteristik dinamik suatu sistem dapat diperoleh dari pengujian fungsi respon frekuensi (FRF). Pada makalah ini menyajikan analisis matematik besar kesalahan magnitude Fungsi Respon Frekuensi (FRF) akibat pengaruh panjang waktu rekam pada pengujian dengan metode eksitasi kejut untuk sistem getaran dua derajat kebebasan. Dalam makalah ini, digunakan asumsi bahwa nilai frekuensi pribadi teredam sama dengan kelipatan bilangan bulat positif dari resolusi frekuensi pada spektrum respon serta menggunakan redaman sebanding. Berdasarkan analisis ini dihasilkan sebuah persamaan untuk menghitung besar kesalahan magnitude FRF akibat terbatasnya panjang waktu rekam. Sebagai contoh ilustrasi, dalam makalah ini disajikan hasil simulasi pengujian FRF dengan metode eksitasi kejut pada empat model sistem getaran satu derajat kebebasan. Simulasi ini dilakukan dengan bantuan program komputer yang dibuat pada perangkat lunak MATLAB. Hasil simulasi menunjukkan bahwa besar kesalahan magnitude FRF yang diperoleh sangat dekat dengan besar kesalahan yang dihitung dengan menggunakan persamaan teoritik yang diturunkan.

Kata kunci : *Panjang Waktu Rekam, Fungsi Respon Frekuensi, Dua Derajat Kebebasan*

1. Pendahuluan

Pengujian getaran bertujuan untuk mengetahui karakteristik dinamik dari suatu sistem. Terdapat tiga buah karakteristik dinamik dari suatu sistem yaitu frekuensi fribadi, rasio redaman, dan modus getar. Informasi ketiga karakteristik dinamik suatu sistem dapat diperoleh dari pengujian fungsi respon frekuensi (FRF).

Meskipun sinyal yang diperoleh selama pengujian eksitasi kejut tidak periodik dan stationer. Pengujian eksitasi kejut (*impact hammer*) sering digunakan untuk menghitung fungsi respon

frekuensi (FRF). Hal ini dikarenakan eksitasi kejut lebih praktis dan peralatan yang digunakan lebih sederhana. Selain itu, pengujian FRF dengan metode eksitasi kejut sangat cocok digunakan pada struktur mekanik yang berukuran relatif kecil.

Jika suatu sistem dieksitasi dengan beban kejut, maka sistem akan bergetar sesaat dan pada akhirnya respon akan menghilang. Pada kondisi nyata, lamanya waktu sistem bergetar secara bebas tergantung pada karakteristik fisik sistem, terutama koefisien redaman. Lamanya waktu perekaman untuk analisis sinyal biasanya dibatasi oleh ukuran memori dan waktu komputasi *Analyzer*.

Nilai magnitude FRF hasil pengujian dengan metode eksitasi kejut sangat dipengaruhi oleh panjang waktu rekam (*time record length*). Ini telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya di berbagai tempat [1,2,3,4]. Fenomena ini seringkali ditemukan dalam pengujian FRF dengan metode eksitasi kejut pada struktur-struktur mekanik yang relatif ringan (konstanta peluruhannya cukup kecil).

Sayangnya, dalam penelitian-penelitian tersebut belum ada yang mengungkapkan secara matematis mengenai hubungan antara panjang waktu rekam dan besar kesalahan magnitude FRF hasil pengujian dengan metode eksitasi kejut untuk dua derajat kebebasan. Ini sangat penting untuk mengetahui parameter apa yang berpengaruh dalam pengujian FRF dengan metode eksitasi kejut untuk pendekatan kondisi sebenarnya yang ada di lapangan. Karena pada kenyataannya tidak ada sistem satu derajat kebebasan.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan analisis matematis untuk mendapatkan hubungan antara panjang waktu rekam dan besar kesalahan magnitude FRF yang diperoleh dari hasil pengujian dengan metode eksitasi kejut untuk sistem dua derajat kebebasan (2 DK). Dalam makalah ini redaman yang digunakan untuk pemodelan adalah jenis redaman sebanding. Sedangkan pembahasan hanya dibatasi pada analisis pengaruh keterbatasan panjang waktu rekam terhadap besar kesalahan magnitude FRF hasil pengujian dengan metode eksitasi kejut.

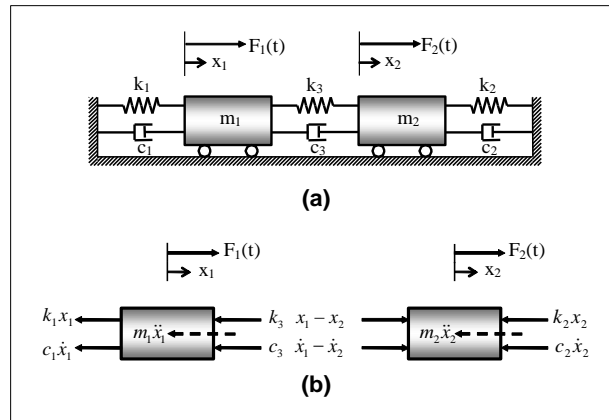
2. Dasar Teori

2.1 Persamaan Gerak

Pemodelan sistem getaran paksa linear yang paling sederhana dimodelkan dengan satu derajat kebebasan. Sistem yang mendekati kondisi sebenarnya memiliki multi derajat kebebasan. Sebagai pendekatan sistem MDOF dibuat sistem dua derajat kebebasan. Suatu sistem dua derajat kebebasan terdiri dari dua buah massa yaitu m_1 dan m_2 , tiga buah redaman c_1 , c_2 , c_3 , tiga buah pegas k_1 , k_2 , k_3 serta dua buah gaya pengeksitasi $f_1(t)$ dan $f_2(t)$ seperti terlihat pada Gambar 1. dua koordinat x_1 dan x_2 menggambarkan posisi kedua massa tersebut relatif terhadap posisi referensi. Jika persamaan gerak diturunkan untuk tiap-tiap massa akan diperoleh hubungan berikut :

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_3 & -c_3 \\ -c_3 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_3 & -k_3 \\ -k_3 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = f \quad t \quad (1)$$

Dimana matrik massa $[m]$, redaman $[c]$, dan kekakuan $[k]$ merupakan matrik simetri.



Gambar 1 (a) Model sistem getaran, (b) DBB

Jika gaya eksitasi $f(t)$ pada Persamaan (1) merupakan gaya eksitasi kejut dengan impuls sebesar satu satuan, maka fungsi gaya tersebut dapat dinyatakan sebagai fungsi delta Dirac yang dinotasikan dengan $\delta(t)$. Secara matematik, fungsi delta Dirac dapat dinyatakan dalam Persamaan (3) berikut:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & \forall t \neq 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases} \quad (2)$$

dan

$$\int_0^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

Modus yang terjadi pada sistem dua derajat kebebasan ini merupakan orthogonal terhadap matrik massa dan matrik kekakuan. Sehingga dapat ditulis hubungan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \psi_2^T \cdot M \cdot \psi_1 &= 0 \\ \psi_2^T \cdot K \cdot \psi_1 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Secara umum, persamaan penormalan massa (Persamaan 3), dapat diperoleh sebagai berikut

$$\begin{aligned} \psi_i^T \cdot M \cdot \psi_i &= m_i \quad i=1,2 \\ \psi_i^T \cdot K \cdot \psi_i &= k_i \quad i=1,2 \end{aligned} \quad (4)$$

Dimana m_i dan k_i masing-masing disebut sebagai massa modal dan kekakuan modal untuk modal vector getaran ke- i . Nilai numerik modulus getar akan digunakan untuk menghitung massa modal dan kekakuan modal.

Masalah yang timbul dalam pembuatan model teoritik suatu sistem getaran MDOF adalah penentuan model redamannya. Bila model matematik suatu sistem getaran memiliki matrik kekakuan dan matrik redaman yang memenuhi hubungan berikut [5,6] :

$$C \cdot M^{-1} K = K \cdot M^{-1} C \quad (5)$$

Maka sistem getaran tersebut memiliki redaman sebanding. Bila hubungan tersebut di atas tidak terpenuhi, maka redaman dalam sistem getaran itu termasuk dalam katagori kasus umum redaman viscos. Pada makalah ini dibahas untuk kasus redaman sebanding, sehingga memenuhi persamaan berikut:

$$c = \psi^T \cdot C \cdot \psi = \alpha m + \beta k \quad (6)$$

Matrik c yang diperoleh merupakan matrik diagonal.

Fungsi respon frekuensi (FRF), respon perpindahan suatu titik x dengan gaya eksitasi pada titik y , secara teoritik dapat ditulis sebagai berikut

$$\alpha_{xy} = \sum_{r=1}^2 \frac{\phi_{xr} \cdot \phi_{yr}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i \cdot \omega \cdot 2\zeta_r \omega_r} \quad (7)$$

dimana

$$\phi_r = \frac{1}{\sqrt{m_r}} \psi_r$$

Dalam bentuk modulus getar *unnormalized*, FRF ditulis dalam bentuk berikut:

$$\alpha_{xy} = \frac{X_x}{F_y} = \sum_{r=1}^2 \frac{\psi_{xr} \cdot \psi_{yr}}{k_r - \omega^2 m_r + i \cdot \omega \cdot c_r} \quad (8)$$

Dimana F_i , X_x , ψ_{xr} dan ψ_{yr} adalah spektrum gaya eksitasi, spektrum keluaran perpindahan, harga vektor modal *unnormalized* ke-r pada titik x, dan harga vektor modal *unnormalized* ke-r pada titik y.

Fungsi respon kejut (*impulse response function*) untuk sistem getaran dua derajat kebebasan diperoleh dengan cara melakukan transformasi fourier balik dari Persamaan (8), sehingga diperoleh persamaan berikut :

$$\alpha_{xy} = \sum_{r=1}^2 \frac{\psi_{xr} \cdot \psi_{yr}}{m_r \cdot \omega_{dr}} e^{-\xi_r \omega_r t} \sin \omega_{dr} t \quad (9)$$

Jika gaya eksitasi berupa fungsi delta diract yang bekerja pada titik x, fungsi respon impuls pada titik y untuk sistem getaran dua derajat kebebasan adalah

$$h(t) = \alpha_{xy} = \frac{\psi_{x1} \cdot \psi_{y1}}{m_1 \cdot \omega_{d1}} e^{-\xi_1 \omega_{n1} t} \sin \omega_{d1} t + \frac{\psi_{x2} \cdot \psi_{y2}}{m_2 \cdot \omega_{d2}} e^{-\xi_2 \omega_{n2} t} \sin \omega_{d2} t \quad (10)$$

2.2 Analisis Besar Kesalahan Magnitude FRF Akibat Keterbatasan Panjang Waktu Rekam untuk Sinyal Kontinue

FRF teoritik suatu sistem getaran 2-DK yang dinotasikan dengan $H_t(j\omega)$, dapat diperoleh berdasarkan transformasi Fourier dari fungsi respon impuls $h(t)$, yaitu:

$$H(j\omega) = \int_0^{\infty} \frac{\psi_{x1} \cdot \psi_{y1}}{m_1 \cdot \omega_{d1}} e^{-\xi_1 \omega_{n1} t} \sin \omega_{d1} t \cdot e^{-j\omega t} dt + \int_0^{\infty} \frac{\psi_{x2} \cdot \psi_{y2}}{m_2 \cdot \omega_{d2}} e^{-\xi_2 \omega_{n2} t} \sin \omega_{d2} t \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (11)$$

$$H(j\omega) = \frac{\psi_{x1} \cdot \psi_{y1}}{m_1 \cdot \omega_{d1}^2 - \xi_1^2 \omega_{n1}^2 + j\omega^2} + \frac{\psi_{x2} \cdot \psi_{y2}}{m_2 \cdot \omega_{d2}^2 - \xi_2^2 \omega_{n2}^2 + j\omega^2}$$

dimana

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}, \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \sigma = \xi \omega = \frac{c}{2m}$$

Sehingga Persamaan (11) dapat disederhanakan menjadi persamaan berikut:

$$H(j\omega) = \frac{\psi_{x1} \cdot \psi_{y1}}{k_1 - \omega^2 m_1 + j\omega c_1} + \frac{\psi_{x2} \cdot \psi_{y2}}{k_2 - \omega^2 m_2 + j\omega c_2} \quad (12)$$

Spektrum respon getaran terukur $X_m(j\omega)$ dapat dihitung berdasarkan transformasi Fourier sinyal respon getaran yang diukur yaitu sebagai berikut :

$$H(j\omega) \Big|_{T_r} = \int_0^{T_r} \frac{\psi_{x1} \cdot \psi_{y1}}{m_1 \cdot \omega_{d1}} e^{-\xi_1 \omega_{n1} - j\omega t} \sin \omega_{d1} t dt + \int_0^{T_r} \frac{\psi_{x2} \cdot \psi_{y2}}{m_2 \cdot \omega_{d2}} e^{-\xi_2 \omega_{n2} - j\omega t} \sin \omega_{d2} t dt \quad (13)$$

$$H(j\omega) \Big|_{T_r} = \frac{\psi_{x1} \cdot \psi_{y1}}{k_1 - \omega^2 m_1 + j\omega c_1} \left[1 - \varepsilon_1(j\omega) \Big|_{T_r} \right] + \frac{\psi_{x2} \cdot \psi_{y2}}{k_2 - \omega^2 m_2 + j\omega c_2} \left[1 - \varepsilon_2(j\omega) \Big|_{T_r} \right]$$

dimana

$$\varepsilon_r(j\omega) \Big|_{T_{RL}} = e^{-\xi_r \omega_{nr} - j\omega T_{RL}} \left(\frac{\xi_r}{\sqrt{1 - \xi_r^2}} \cdot \sin \omega_{dr} T_{RL} + \cos \omega_{dr} T_{RL} + \frac{j\omega}{\omega_{dr}} \cdot \sin \omega_{dr} T_{RL} \right) \quad (14)$$

Pada makalah ini, ε_r disebut sebagai kesalahan spektrum respon akibat terbatasnya panjang waktu rekam modulus ke-m FRF. Seperti yang telah disebutkan pada paragraf sebelumnya, Persamaan (11)

menunjukkan bahwa FRF teoritik multi derajat kebebasan dapat dihitung dari spektrum respon impuls sepanjang waktu rekan tertentu. Berdasarkan Persamaan (14) terlihat bahwa besar kesalahan magnitude respon merupakan fungsi dari panjang waktu rekam. Jika panjang waktu rekam menuju tak hingga, maka kesalahan magnitude spektrum respon akan menuju nol.

3. Hasil Simulasi dan Diskusi

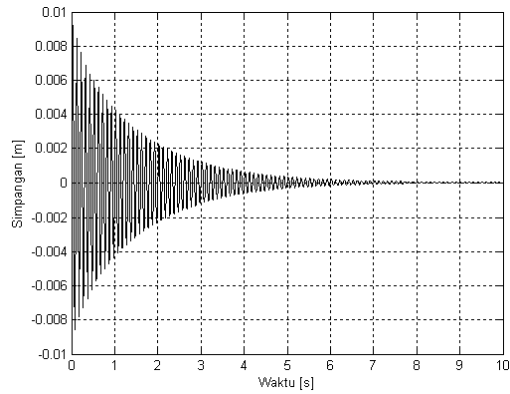
Dalam simulasi model getaran pada makalah ini terdiri atas dua model sistem getaran, yakni model A dan Model B seperti terlihat pada Tabel 1. Pengukuran FRF untuk masing-masing model menggunakan metode point FRF dan transfer FRF. Model A memiliki dua frekuensi teredam yang berjauhan, yaitu $fd_1=10$ hz dan $fd_2=50$ hz. sedangkan model B kedua frekuensi teredamnya berdekatan masing-masing sebesar 10 hz dan 11 hz.

Tabel 1 Parameter model sistem getaran 2-DK yang digunakan dalam simulasi

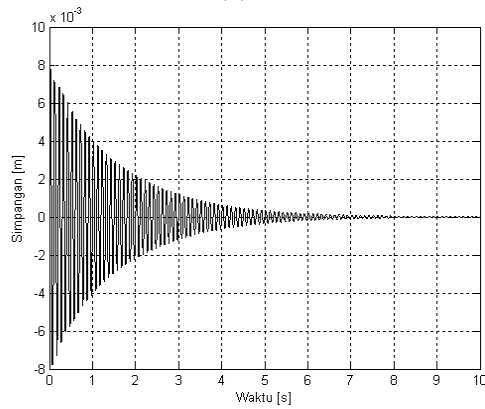
Model	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)	f_d (Hz)	ζ
A	$m_1=1$ $m_2=1$	$C_1=1.256$	$K_1=3948.23$	$fd_1=10$	$\zeta_1=0.01$
		$C_2=1.256$	$K_2=3948.23$	$fd_2=50$	$\zeta_2=0.005$
		$C_3=2.513$	$K_3=47378.84$		
B	$m_1=1$ $m_2=1$	$C_1=1.256$	$K_1=39518.42$	$fd_1=10$	$\zeta_1=0.01$
		$C_2=1.256$	$K_2=39518.42$	$fd_2=11$	$\zeta_2=0.01$
		$C_3=0.063$	$K_3=4130.23$		

Untuk memberikan gambaran mengenai pengaruh panjang waktu rekam terhadap besar kesalahan magnitude pada pengujian FRF dengan metode eksitasi kejut, maka dilakukan simulasi pengujian FRF pada beberapa panjang waktu rekam. Panjang waktu rekam yang digunakan untuk kesua model sistem getaran A dan B dalam simulasi ini adalah sebesar 2, 4, 8 dan 10 detik. Model A didesain sedemikian rupa sehingga kedua frekuensi pribadi terletak saling berjauhan, sementara model B didesain dengan frekuensi yang saling berdekatan.

Berikut ini ditunjukkan hasil simulasi pengujian FRF pada masing-masing model sistem getaran. Gambar 2 sampai dengan Gambar 3 memperlihatkan respon simpangan masing-masing model sistem getaran yang diakibatkan oleh impuls satuan. Gambar 2 merupakan respon simpangan untuk Model A dengan metode pencuplikan point FRF dan transfer FRF. Sedangkan Gambar 3 respon simpangan dari model B. Pada model A respon dari kedua metode FRF terlihat tidak ada perbedaan yang berarti. Sementara pada model B terlihat jelas perbedaan respon simpangan antara metode point FRF dan transfer FRF. Selain itu pada model B adanya fenomena *beating*, hal ini dikarenakan frekuensi pribadi sistem saling berdekatan.

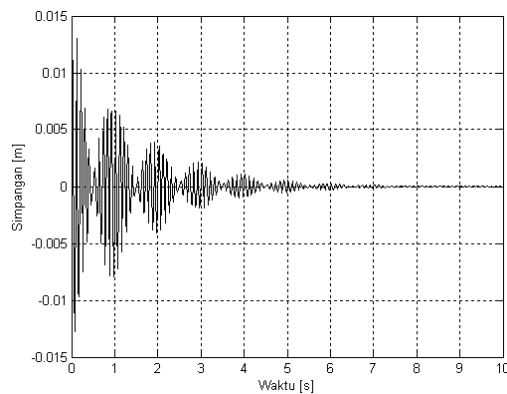


(a)

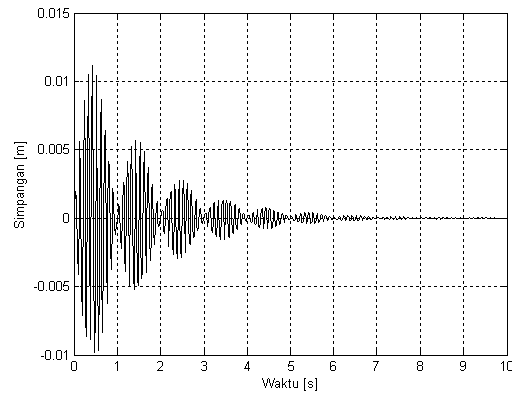


(b)

Gambar 2 Respon impuls satuan model sistem getaran A (a) dengan metode point FRF, (b) transfer FRF



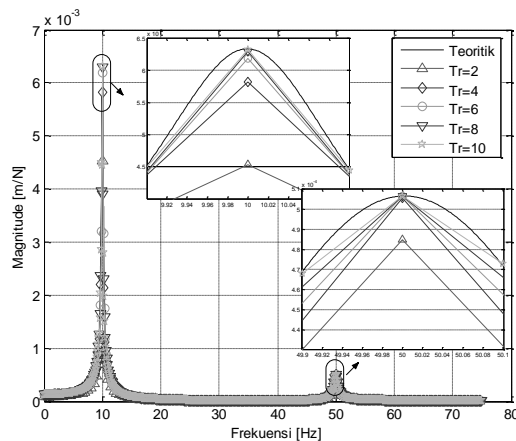
(a)



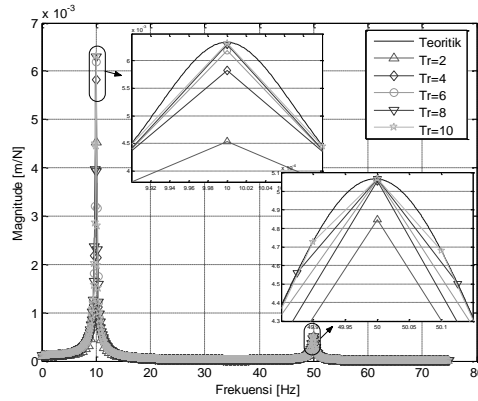
(b)

Gambar 3 Respon impuls satuan model sistem getaran B (a) dengan metode point FRF, (b) transfer FRF

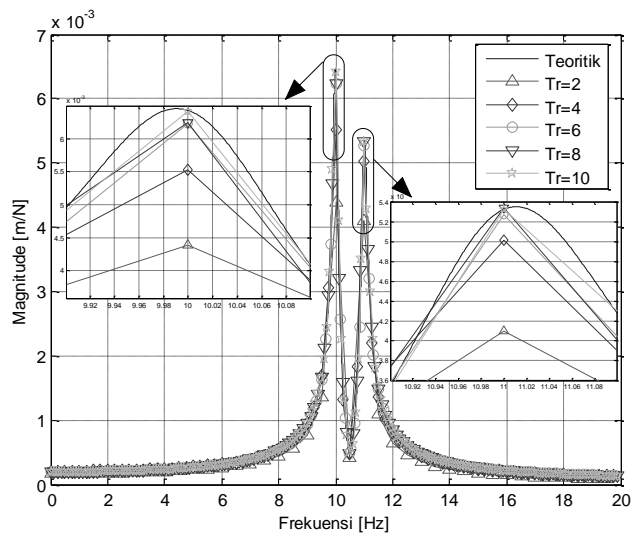
Pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 7 diperlihatkan hasil simulasi pengujian FRF dengan metode eksitasi kejut pada dua model sistem getaran dengan masing-masing metode FRF. Keempat gambar tersebut menunjukkan bahwa magnitudo FRF dengan panjang waktu rekam yang terbatas selalu lebih kecil daripada magnitudo FRF teoritik. Sebagai contoh, pada masing-masing gambar diperlihatkan nilai magnitudo FRF pada dua frekuensi yang berbeda untuk berbagai panjang waktu rekam. Selain itu, pada keempat gambar tersebut juga dapat dilihat bahwa semakin panjang waktu rekam yang digunakan dalam pengujian FRF dengan metode eksitasi kejut, maka magnitudo FRF yang akan diperoleh dari pengujian tersebut akan semakin mendekati nilai teoritiknya. Dengan kata lain, semakin besar panjang waktu rekam yang digunakan dalam pengujian FRF dengan metode eksitasi kejut, maka besar kesalahan magnitudo FRF yang diperoleh akan semakin kecil. Sebaliknya, semakin kecil panjang waktu rekam yang digunakan, maka magnitudo FRF yang diperoleh akan semakin kecil dibandingkan dengan nilai teoritiknya.



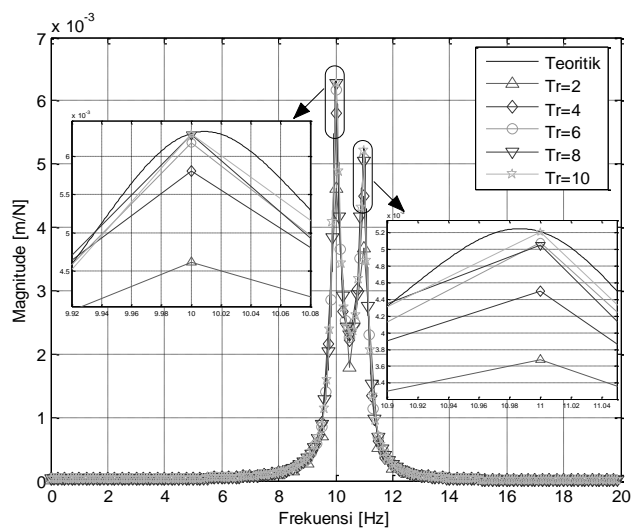
Gambar 4 Point FRF model sistem getaran A untuk berbagai panjang waktu rekam



Gambar 5 Transfer FRF model sistem getaran B untuk berbagai panjang waktu rekam



Gambar 6 Point FRF model sistem getaran C untuk berbagai panjang waktu rekam



Gambar 7 Transfer FRF model sistem getaran D untuk berbagai panjang waktu rekam

Berdasarkan gambar di atas dapat disimpulkan bahwa semakin besar panjang waktu rekam yang digunakan dalam pengujian, maka magnitude FRF yang diperoleh dari hasil pengujian semakin

mendekati nilai yang teoritiknya. Selain itu, tampak juga bahwa bila panjang waktu rekam yang digunakan dalam pengujian cukup kecil, maka nilai magnitude FRF yang diperoleh akan lebih kecil dibandingkan dengan nilai teoritiknya.

Hasil kesalahan magnitude FRF masing-masing model yang diperoleh dari simulasi pengujian disajikan pada Tabel 2. Besar kesalahan magnitude FRF hasil simulasi ini dihitung berdasarkan besar kesalahan sebagaimana didefinisikan dalam Persamaan (14). Di sini terlihat bahwa besar kesalahan magnitude FRF pada beberapa frekuensi yang diperoleh dari hasil simulasi pengujian sangat dekat dengan besar kesalahan yang dihitung dengan menggunakan Persamaan (14).

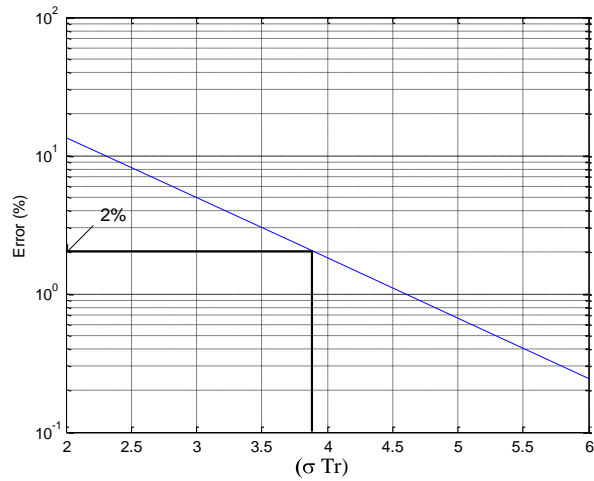
Tabel 2 Besar kesalahan (ϵ) hasil simulasi pengujian FRF untuk berbagai nilai (σT_r)

Model	Metode Cuplik	T_r	Error (%)	
			f_1	f_2
A	Point FRF	2	28.4657	4.3150
		4	8.0962	0.1776
		6	2.3018	0.0039
		8	0.6527	0.0020
		10	0.1835	0.0020
	Transfer FRF	2	28.4577	4.3210
		4	8.0971	0.1856
		6	2.3027	0.0059
		8	0.6537	0.0020
		10	0.1845	0.0020
B	Point FRF	2	31.7001	23.1172
		4	14.0241	5.7912
		6	3.0324	0.9754
		8	2.8632	0.2952
		10	0.2344	0.0212
	Transfer FRF	2	26.6677	29.3666
		4	7.7358	13.6822
		6	1.8859	2.5073
		8	0.2485	3.0449
		10	0.1863	0.1006

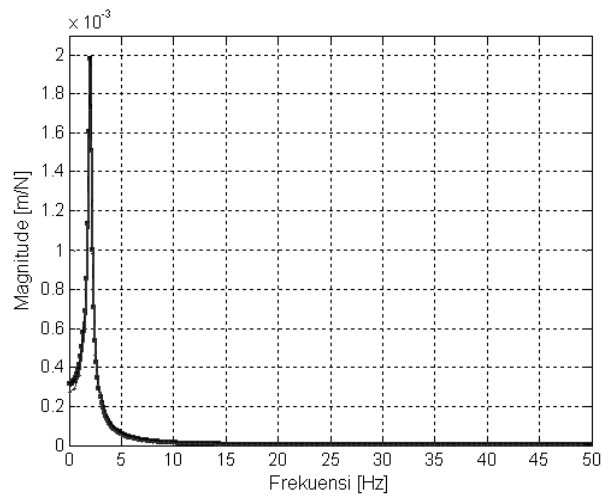
Model A memiliki harga ζ sebesar 0.628 untuk modus pertama dan 1.57 untuk modus kedua. Sedangkan pada model B diperoleh harga sebesar 0.628 dan 0.691. Harga σ diperoleh berdasarkan persamaan berikut, $\sigma_r = \zeta_r \cdot \omega_r$. Untuk melihat pengaruh $\sigma \cdot T_r$ terhadap kesalahan magnitude, di plot grafik hasil simulasi dari Tabel 2.

Dari Tabel 2 terlihat bahwa kesalahan magnitude untuk point FRF dan transfer FRF pada Model A relatif sama. Sedangkan pada model B, kesalahan magnitude terjadi perbedaan yang besar antara point FRF dan transfer FRF. Ini menunjukkan bahwa untuk frekuensi yang berdekatan, frekuensi pertama dipengaruhi oleh frekuensi tetangganya, sehingga muncul perbedaan hasil cuplik untuk metode yang berbeda.

Untuk menyajikan hasil simulasi unuk Berdasarkan Tabel 2 kesalahan magnitude FRF dapat ditampilkan dalam bentuk grafik berikut



Gambar 8 Grafik besar kesalahan magnitudo FRF akibat panjang waktu rekam yang terbatas (skala semilog)



Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Berdasarkan gambar terlihat bahwa kesalahan magnitudo FRF berbanding terbalik dengan panjang waktu rekam. Semakin lama waktu rekam, maka semakin kecil kesalahan magnitudo FRF. Di sini terlihat bahwa besar kesalahan magnitudo FRF pada beberapa frekuensi yang diperoleh dari hasil simulasi pengujian sangat dekat dengan besar kesalahan yang dihitung dengan menggunakan Persamaan (14).

4. KESIMPULAN

1. Besar kesalahan magnitudo FRF hasil pengujian dengan metode eksitasi kejut tergantung pada panjang waktu rekam (T_r) dan nilai konstanta peluruhan (σ) sistem getaran yang diuji.
2. Semakin besar panjang waktu rekam yang digunakan dalam pengujian FRF dengan metode eksitasi kejut, semakin kecil kesalahan magnitudo FRF yang akan diperoleh. Sebaliknya, semakin pendek panjang waktu rekam yang digunakan, semakin besar kesalahan magnitudo FRF yang akan diperoleh.
3. Bila diinginkan kesalahan magnitudo FRF kurang dari 2 %, maka nilai σT_r minimum yang diperlukan adalah sebesar 4.
4. Berdasarkan hasil analisis matematik dan hasil simulasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa besar kesalahan magnitudo respon getaran dua derajat kebebasan kasus redaman sebanding, serupa dengan kasus satu derajat kebebasan [3].
5. Dua buah frekuensi yang berdekatan akan saling mempengaruhi frekuensi tetangganya, sehingga terdapat perbedaan kesalahan magnitudo antara metode point FRF dengan transfer FRF.

5. Daftar Pustaka

- [1]. Ahn, S.E., Jeong, W.B., Yoo, W.S., *An Estimation of Error-Free Frequency Response Function from Impact Hammer Testing*, JSME International Journal, Series C, Vol.47, No.3, hal 852-857, 2004.
 - [2]. Ahn, S.E., Jeong, W.B., Yoo, W.S., *Improvement of Impulse Response Spectrum and its Application*, Journal of Sound and Vibration 288, hal. 1223-1239, 2005.
 - [3]. Partogi, Agusmian, *Analisis Kesalahan Hasil Pengujian FRF dengan Metode Eksitasi Kejut*, Tesis Magister Teknik Mesin ITB, 2006.
 - [4]. McConnell, K.G., *Vibration Testing: Theory and Practice*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
 - [5]. Ewins, D.J., *Modal Testing : Theory, practice and application*, Research Studies Press Ltd., 2000.
 - [6]. Meirovitch, L., *Elements of Vibration Analysis*, McGraw-Hill, 2nd Edition, Singapore, 1986.
-