

Kajian Numerik dan Eksperimental Metode Pengontrolan Eksitasi *Swept-sine* untuk Meningkatkan Ketelitian Pengukuran FRF

ASMARA YANTO^{1*}, ZAINAL ABIDIN²

¹Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri – ITP

Jl. Gajah Mada Kandis Nanggalo, Padang 25143, Indonesia

²Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara – ITB

Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia

*asmarayanto@yahoo.com

Abstrak: Eksitasi *shaker* sering digunakan pada pengukuran FRF (Fungsi Respon Frekuensi) suatu sistem karena frekuensinya dapat dikontrol dengan baik. Jenis eksitasi *shaker* yang sering digunakan adalah eksitasi *swept-sine*. Pada makalah ini, dilakukan kajian numerik dan eksperimental terhadap pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine*. Disini, eksitasi *swept-sine* dikontrol dengan sinyal *linear swept-sine* (eksitasi *linear swept-sine*) dan sinyal *three-step swept-sine* (eksitasi *three-step swept-sine*). Eksitasi *linear swept-sine* merupakan eksitasi yang sering digunakan pada pengukuran FRF, sedangkan eksitasi *three-step swept-sine* merupakan eksitasi yang dikembangkan pada makalah ini. Simulasi numerik untuk pengukuran FRF model sistem satu derajat kebebasan dengan eksitasi *three-step swept-sine* menghasilkan magnitudo FRF pada frekuensi resonansi yang lebih teliti daripada magnitudo FRF yang diperoleh dengan eksitasi *linear swept-sine*. Hasil simulasi numerik juga menunjukkan bahwa semakin tinggi harga magnitudo FRF pada frekuensi resonansi dengan eksitasi *three-step swept-sine* semakin mendekati harga FRF teoritiknya. Pengujian eksperimental menghasilkan magnitudo FRF pada frekuensi resonansi untuk sistem nyata dengan eksitasi *three-step swept-sine* lebih tinggi daripada magnitudo FRF dengan eksitasi *linear swept-sine*. Untuk sistem nyata, harga magnitudo FRF pada frekuensi resonansi tidak dapat ditentukan. Dengan mengacu kepada hasil simulasi, magnitudo FRF pada frekuensi resonansi yang semakin tinggi mengindikasikan harga aktualnya. Dengan demikian, metode eksitasi *three-step swept-sine* yang dikembangkan pada penelitian ini dapat meningkatkan ketelitian pada pengukuran FRF dengan eksitasi *shaker*.

Kata kunci: FRF, *linear swept-sine*, *three-step swept-sine*, frekuensi resonansi, magnitudo FRF

1. PENDAHULUAN

Eksitasi *shaker* pada pengukuran FRF (Fungsi Respon Frekuensi) membutuhkan perangkat pengekstisasi yang terdiri atas generator sinyal, *power amplifier*, *shaker*, dan alat penghubung *shaker* ke sistem uji [1-4]. Ada beberapa sinyal pengontrol eksitasi *shaker* pada generator sinyal yang dapat digunakan, tetapi *linear swept-sine* adalah jenis sinyal yang paling sering digunakan.

Pada pengukuran FRF dengan eksitasi *shaker* yang dikontrol dengan sinyal *linear swept-sine* (eksitasi *linear swept-sine*), lama eksitasi di sekitar frekuensi resonansi sistem uji memiliki persentase waktu yang kecil terhadap waktu *swept*. Waktu *swept* adalah waktu yang dibutuhkan untuk mengekstisasi sistem uji pada pengukuran FRF dengan *span* frekuensi tertentu. Dengan eksitasi *linear swept-sine*, data respon getaran sistem yang diperoleh di sekitar respon getaran maksimum memiliki jumlah data dengan persentase yang kecil terhadap jumlah data total. Hal ini diduga menghasilkan magnitudo FRF di sekitar frekuensi resonansi sistem yang tidak teliti. Padahal magnitudo FRF di sekitar frekuensi resonansi lebih penting daripada di frekuensi yang lain. Oleh karena,

pengukuran FRF dengan eksitasi *linear swept-sine* sering tidak mampu untuk menghasilkan magnitudo FRF yang teliti di sekitar ferkuensi resonansi [5-7].

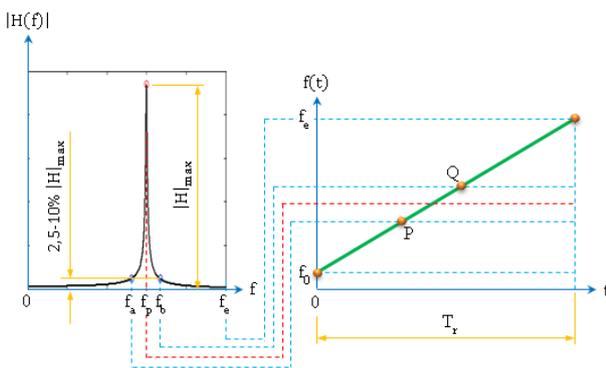
Pada makalah ini dikembangkan metode pengontrolan eksitasi *shaker* dengan sinyal *three-step swept-sine sine* (eksitasi *three-step swept-sine*). Meskipun *span* frekuensi dan waktu *swept* pada eksitasi *three-step swept-sine* dipertahankan sama dengan *span* frekuensi dan waktu *swept* pada eksitasi *linear swept-sine*, diharapkan diperoleh magnitudo FRF yang lebih teliti daripada magnitudo FRF dengan eksitasi *linear swept-sine*.

2. METODOLOGI

Hubungan frekuensi eksitasi *linear swept-sine* terhadap waktu diekspresikan dengan fungsi *linear swept* [8]. Pada fungsi ini, kandungan frekuensi berubah secara linier dari frekuensi awal f_0 hingga frekuensi akhir f_e terhadap waktu. Fungsi *linear swept* dinotasikan dengan $f_{lin}(t)$. Untuk waktu *swept* selama waktu rekam T_r , fungsi $f_{lin}(t)$ diekspresikan dengan

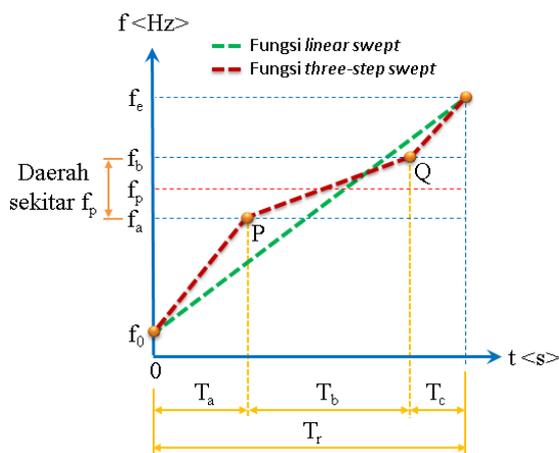
$$f_{lin}(t) = (f_e - f_0) \frac{t}{T_r} + f_0 ; 0 \leq t \leq T_r . \quad (1)$$

Pada sistem satu derajat kebebasan (*Single Degree of Freedom* atau *SDOF*), hubungan kurva magnitudo FRF sistem, $|H(f)|$, dengan sebuah fungsi *linear swept* dapat diilustrasikan dengan Gambar 1. Apabila puncak magnitudo FRF $|H|_{\max}$ yang berada pada frekuensi resonansi (*peak frequency*, f_p) diketahui, maka dipilih dua buah frekuensi yang masing-masing di bawah dan di atas f_p yaitu frekuensi f_a dan f_b . Frekuensi f_a dan f_b merupakan frekuensi yang membatasi daerah sekitar f_p . Frekuensi f_a dan f_b adalah frekuensi pada ketinggian magnitudo sekitar 2,5-10% $|H|_{\max}$. Pemilihan ketinggian 2,5-10% $|H|_{\max}$ karena pada harga tersebut perubahan frekuensi telah mulai menyebabkan perubahan harga magnitudo FRF mulai membesar.



Gambar 1. Hubungan kurva magnitudo FRF sistem *SDOF* dengan sebuah fungsi *linear swept*.

Pada fungsi *linear swept*, posisi f_a dan f_b masing-masing ditandai dengan titik P dan titik Q. Untuk pengembangan fungsi *three-step swept*, dilakukan perubahan posisi P dan Q seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Fungsi *three-step swept* yang dikembangkan dari hubungan kurva magnitudo FRF sistem *SDOF* dengan sebuah fungsi *linear swept*.

Dengan mengubah posisi P dan Q, waktu *swept* untuk rentang frekuensi dari f_0 hingga f_a menjadi lebih pendek daripada sebelumnya dan waktu *swept* dari f_a hingga f_b menjadi lebih panjang daripada sebelumnya. Selain itu, pada Gambar 2 dapat juga dilihat bahwa laju perubahan frekuensi (*swept rate*) di daerah sekitar f_p menjadi lebih lambat daripada sebelumnya. Fungsi *three-step swept* pada Gambar 2 dinotasikan dengan $f_{111}(t)$. Fungsi ini disusun oleh tiga buah fungsi *linear swept*. Fungsi $f_{111}(t)$ dapat diekspresikan dalam bentuk

$$f_{111}(t) = \begin{cases} f_{1a}(t) & ; 0 \leq t < T_a \\ f_{1b}(t) & ; T_a \leq t < T_a + T_b \\ f_{1c}(t) & ; T_a + T_b \leq t \leq T_r \end{cases} \quad (2)$$

dengan

$$f_{1a}(t) = (f_a - f_0) \left(\frac{t}{T_a} \right) + f_0 ; 0 \leq t < T_a, \quad (3)$$

$$f_{1b}(t) = (f_b - f_a) \left(\frac{t - T_a}{T_b} \right) + f_a ; T_a \leq t < T_a + T_b, \quad (4)$$

$$f_{1c}(t) = (f_e - f_b) \left(\frac{t - T_a - T_b}{T_c} \right) + f_b ; T_a + T_b \leq t \leq T_r, \quad (5)$$

- di mana: $f_{1a}(t)$ = fungsi *linear swept* pada *step-1*,
 $f_{1b}(t)$ = fungsi *linear swept* pada *step-2*,
 $f_{1c}(t)$ = fungsi *linear swept* pada *step-3*,
 T_a = waktu *swept* pada *step-1* untuk rentang frekuensi dari f_0 sampai f_a ,
 T_b = waktu *swept* pada *step-2* untuk rentang frekuensi dari f_a sampai f_b ,
 T_c = waktu *swept* pada *step-3* untuk rentang frekuensi dari f_b sampai f_e .

A. Simulasi Numerik Pengontrolan Eksitasi *Swept-sine* untuk Meningkatkan Ketelitian Pengukuran FRF

Simulasi metode eksitasi *three-step swept-sine* untuk meningkatkan ketelitian magnitudo hasil pengukuran FRF sistem *SDOF* terdiri atas beberapa proses. Proses I adalah untuk menghitung magnitudo FRF teoritik $|H_{teo}(f)|$ model sistem *SDOF*. Masukan yang diperlukan pada Proses I adalah massa m , peredam c , dan kekakuan k . Untuk memperoleh $|H_{teo}(f)|$, frekuensi pribadi f_n dan rasio redaman ζ dari model sistem *SDOF* dihitung terlebih dahulu. Sebagaimana yang telah diturunkan pada buku-buku getaran, f_n dan ζ masing-masing dapat dihitung dengan

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (6)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}. \quad (7)$$

Magnitudo FRF teoritik model sistem *SDOF* $|H_{teo}(f)|$ diperoleh dengan

$$|H_{teo}(f)| = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{f}{f_n}\right)^2}} \quad (8)$$

Berikutnya adalah Proses II untuk menghitung fungsi *swept* $f(t)$ dan eksitasi *swept-sine* $u(t)$. Untuk simulasi pertama, masukan yang diperlukan pada Proses II adalah f_0 , f_e , T_r , dan amplitudo eksitasi, A . Simulasi pertama pengukuran FRF model sistem *SDOF* dilakukan dengan eksitasi *linear swept-sine*. Untuk simulasi kedua dan selanjutnya dengan eksitasi *three-step swept*, masukan yang diperlukan pada Proses II adalah f_0 , f_e , T_r , A , f_a , f_b , T_a , dan T_b . Eksitasi $u(t)$ diekspresikan dengan

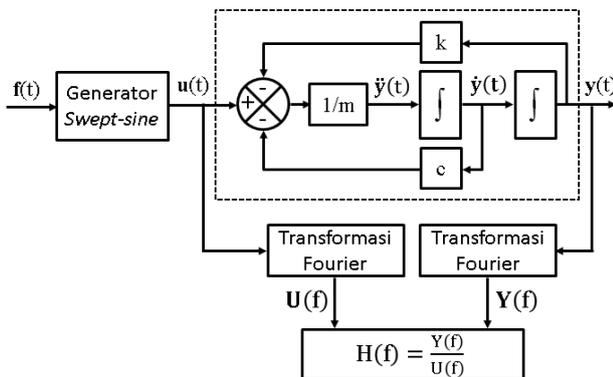
$$u(t) = A \sin \left\{ 2\pi \int [f(t)] dt \right\}, \quad (9)$$

di mana untuk simulasi dengan eksitasi *linear swept-sine*, $f(t) = f_{lin}(t)$ dan untuk simulasi dengan eksitasi *three-step swept-sine*, $f(t) = f_{111}(t)$.

Selanjutnya adalah Proses III untuk simulasi getaran model sistem *SDOF*. Kemudian, magnitudo FRF dengan eksitasi *swept-sine*, $|H(f)|$, dan kesalahannya terhadap magnitudo FRF teoritik $|H_{teo}(f)|$ pada frekuensi resonansi, $\epsilon_\alpha(f_p)$ dihitung pada Proses IV. Apabila $\epsilon_\alpha(f_p)$ yang diperoleh lebih besar dari batas kesalahan yang diinginkan ϵ_{ref} , maka simulasi dilanjutkan dengan Proses V untuk memperoleh harga f_a , f_b , T_a , dan T_b . Selanjutnya simulasi kembali ke Proses II-IV hingga diperoleh $\epsilon_\alpha(f_p) \leq \epsilon_{ref}$. Harga $\epsilon_\alpha(f_p)$ dihitung dengan

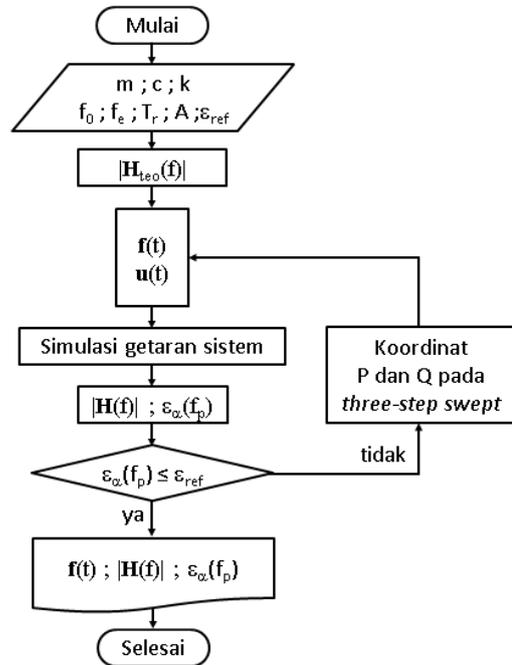
$$\epsilon_\alpha(f_p) = \frac{|H_{teo}(f_p) - |H(f_p)|}{|H_{teo}(f_p)|} 100\% \quad (10)$$

Proses dari fungsi $f(t)$ hingga diperoleh FRF model sistem *SDOF* dapat dipresentasikan dengan diagram seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram pengukuran FRF model sistem *SDOF* dengan pengontrolan eksitasi *swept-sine*.

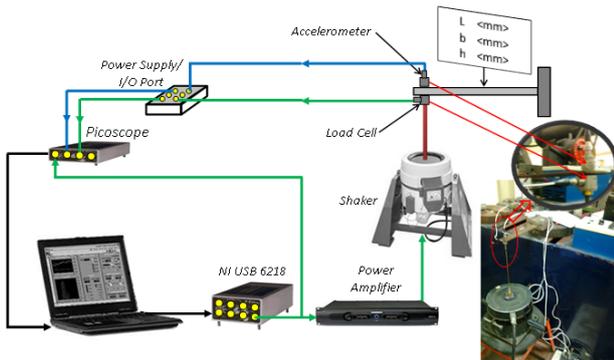
Algoritma metode eksitasi *three-step swept-sine* untuk meningkatkan ketelitian magnitudo hasil pengukuran FRF model sistem *SDOF* dapat diilustrasikan dengan diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir simulasi metode eksitasi *three-step swept-sine* untuk meningkatkan ketelitian magnitudo hasil pengukuran FRF model sistem *SDOF*.

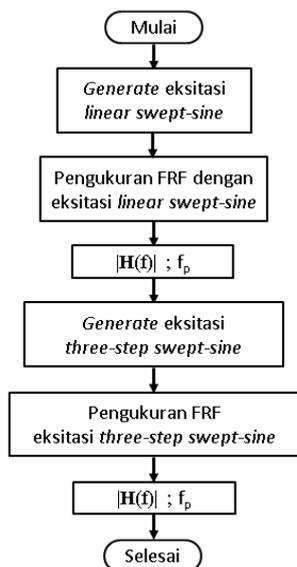
B. Pengujian Eksperimental Pengontrolan Eksitasi *Swept-sine* untuk Meningkatkan Ketelitian Pengukuran FRF

Pada pengujian eksperimental, sinyal eksitasi *swept-sine* dikirimkan melalui perangkat pengakuisisi data NI USB 6218 dengan menggunakan generator sinyal pada komputer ke perangkat pengeksitasi yang terdiri atas *power amplifier*, *shaker*, dan alat penghubung *shaker* ke sistem uji. Eksitasi *swept-sine* yang dihasilkan oleh *shaker* diukur dengan menggunakan *load cell* yang mempunyai sensitivitas sebesar 54,1 mV/N. Respon sistem yang diukur adalah percepatan getaran sistem. Untuk pengukuran percepatan getaran sistem uji digunakan *accelerometer* dengan sensitivitas sebesar 10,43 mV/(m/s²). Sinyal eksitasi dan sinyal percepatan di cuplik dengan sebuah *Picoscope* yang terhubung ke komputer. Adapun sistem yang diuji adalah sistem nyata berupa sebuah batang kantilever. Skema pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine* yang dilakukan terhadap sistem ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Skema pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine* pada sistem nyata berupa sebuah batang kantilever.

Prosedur pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine* pada sistem nyata dapat ditunjukkan pada Gambar 6. Mula-mula pengukuran FRF dilakukan dengan eksitasi *linear swept-sine*. Parameter eksitasi *linear swept-sine* adalah *span* frekuensi, waktu *swept*, dan amplitudo *A*. Setelah diperoleh data pengukuran dari *load cell* dan *accelerometer*, dilakukan pengolahan data untuk mendapatkan kurva magnitudo FRF. Dari kurva magnitudo FRF dapat diketahui harga f_p dan magnitudo FRF pada f_p , $|H(f_p)|$. Dengan mengetahui harga f_p , parameter eksitasi *three-step swept-sine* berupa f_a dan f_b dapat ditentukan.



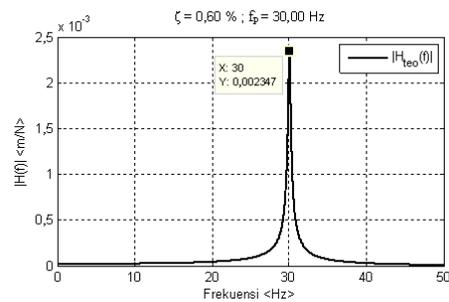
Gambar 6. Prosedur pengukuran FRF dengan eksitasi *swept-sine*.

Selanjutnya dilakukan pengukuran FRF dengan eksitasi *three-step swept-sine* di mana *span* frekuensi dan waktu *swept* dipertahankan tetap sama pada pengukuran FRF

dengan eksitasi *linear swept-sine*.

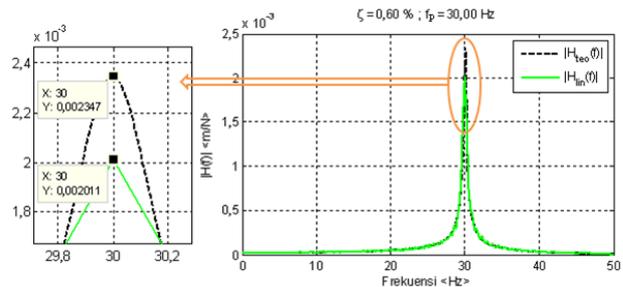
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi metode eksitasi *three-step swept-sine* untuk meningkatkan ketelitian magnitudo hasil pengukuran FRF sistem *SDOF* dilakukan terhadap sebuah model sistem dengan $m = 1$ kg, $c = 2,26$ Ns/m, dan $k = 35.530,58$ N/m. Harga f_p diperoleh sebesar 30 Hz dan harga $\zeta = 0,6\%$. Kurva $|H_{teo}(f)|$ untuk $f_0 = 0$ Hz dan $f_c = 50$ Hz ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva $|H_{teo}(f)|$ untuk model sistem *SDOF*.

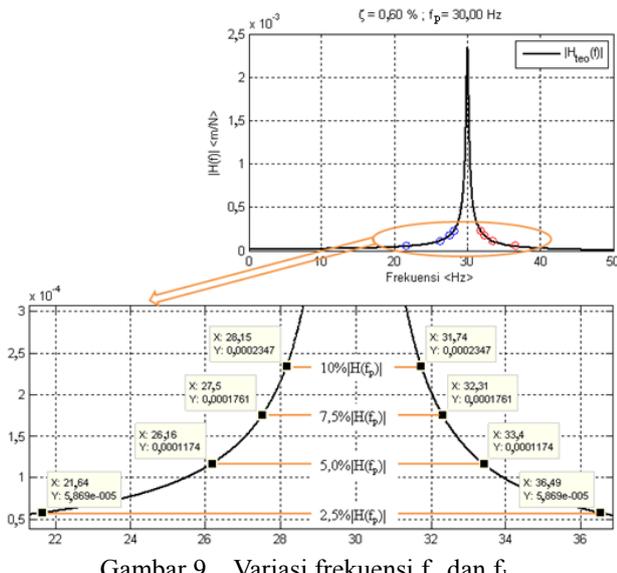
Selanjutnya, simulasi pengukuran FRF model sistem *SDOF* dengan eksitasi *linear swept-sine* dengan $f_0 = 0$ Hz, $f_c = 50$ Hz, $T_r = 4$ s, dan $A = 1$ N menghasilkan kurva magnitudo FRF $|H_{lin}(f)|$ seperti pada Gambar 8. Harga $|H_{lin}(f_p)|$ diperoleh sebesar $2,011 \times 10^{-3}$ m/N.



Gambar 8. Kurva $|H_{lin}(f)|$ untuk model sistem *SDOF*.

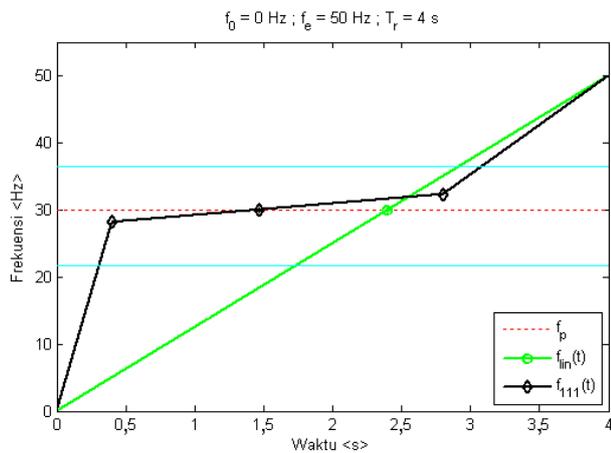
Jika dibandingkan dengan harga $|H_{teo}(f_p)|$ sebesar $2,347 \times 10^{-3}$ m/N, maka $|H_{lin}(f_p)|$ yang diperoleh mempunyai kesalahan sebesar 14,32 %. Jika $\epsilon_{ref} = 5\%$, maka dapat dikatakan bahwa eksitasi *linear swept-sine* menghasilkan magnitudo FRF pada frekuensi resonansi yang tidak teliti.

Berikutnya dilakukan simulasi pengukuran FRF model sistem *SDOF* dengan eksitasi *three-step swept-sine*. Disini, posisi P dan Q pada fungsi *three-step swept* terlebih dahulu ditentukan. Penentuan posisi P dan Q berdasarkan variasi frekuensi f_a dan f_b pada Gambar 9. Lama T_a divariasikan dari $5\%T_r$ sampai $20\%T_r$ dengan kenaikan $5\%T_r$ dan lama T_b divariasikan dari $50\%T_r$ sampai $95\%T_r$ dengan kenaikan $5\%T_r$.



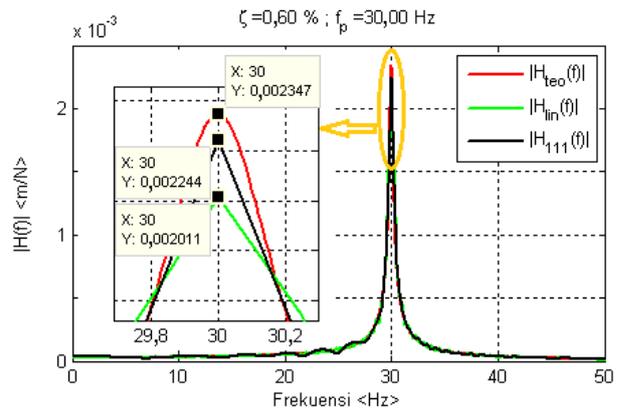
Gambar 9. Variasi frekuensi f_a dan f_b .

Simulasi pengukuran FRF model sistem *SDOF* dengan eksitasi *three-step swept-sine* dilakukan secara iteratif berdasarkan posisi P dan Q. Fungsi *three-step swept* yang diperoleh dari simulasi secara iteratif dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Fungsi *three-step swept* dari simulasi pengukuran FRF model sistem *SDOF* dengan eksitasi *three-step swept-sine* secara iteratif.

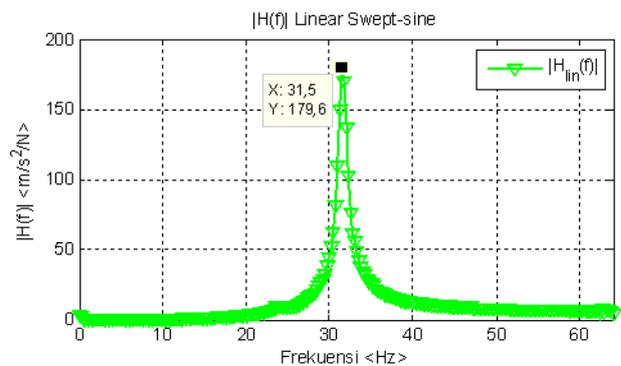
Harga f_a/f_p , f_b/f_p , T_a/T_r , dan T_b/T_r dari fungsi *three-step swept* pada Gambar 10 masing-masing adalah 0,94; 1,08; 0,10; dan 0,60. Perbandingan magnitudo FRF pada f_p dengan eksitasi *three-step swept-sine* terhadap magnitudo FRF pada f_p dengan eksitasi *linear swept-sine* ditunjukkan pada Gambar 11. Harga magnitudo FRF pada f_p dengan eksitasi *three-step swept-sine*, $|H_{111}(f_p)| = 2,244 \times 10^{-3}$ m/N, memiliki kesalahan terhadap $|H_{teo}(f_p)|$ sebesar 4,42 %.



Gambar 11. Perbandingan $|H_{lin}(f)$ dan $|H_{111}(f)$ terhadap $|H_{teo}(f)$.

Simulasi pengukuran FRF model sistem *SDOF* dengan eksitasi *linear swept-sine* menghasilkan $|H(f_p)|$ yang tidak teliti sedangkan simulasi dengan eksitasi *three-step swept-sine* menghasilkan $|H(f_p)|$ yang teliti. Eksitasi *three-step swept-sine* pada simulasi ini menghasilkan kesalahan $|H(f_p)|$ terhadap $|H_{teo}(f_p)|$ di bawah batas kesalahan yang diinginkan. Dari grafik fungsi *three-step swept* dapat diketahui bahwa waktu *swept* di daerah f_p adalah 60 % dari T_r . Dengan eksitasi *three-step swept-sine*, waktu *swept* di daerah f_p berlangsung lebih lama daripada dengan eksitasi *linear swept-sine*, sehingga diperoleh $|H(f_p)|$ yang lebih teliti.

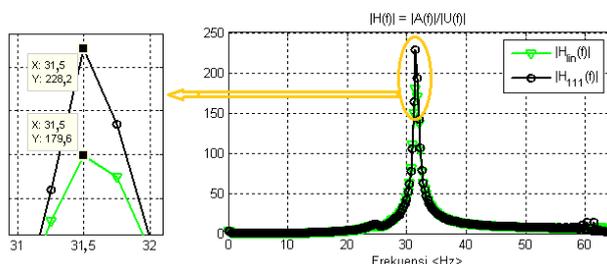
Pada pengujian eksperimental, sistem uji adalah sistem nyata berupa sebuah batang kantilever dengan dimensi panjang $L = 275$ mm, lebar $b = 34$ mm, dan tebal $h = 3$ mm. Pengukuran FRF dengan eksitasi *linear swept-sine* dilakukan dengan $f_0 = 0$ Hz, $f_e = 64$ Hz, $T_r = 4$ s, dan $A = 1$ N. Magnitudo FRF yang diperoleh dari pengukuran dengan eksitasi *linear swept-sine*, $|H_{lin}(f)|$, ditunjukkan pada Gambar 12. Frekuensi f_p yang diperoleh adalah sebesar 31,5 Hz dengan $|H_{lin}(f_p)| = 179,6$ (m/s²)/N.



Gambar 12. Kurva $|H_{lin}(f)|$ batang kantilever dengan eksitasi *linear swept-sine*.

$L = 275$ mm, $b = 34$ mm, dan $h = 3$ mm.

Dari harga f_p yang diperoleh pada pengukuran FRF dengan eksitasi *linear swept-sine*, kemudian ditentukan parameter *three-step swept* berupa $f_a = 0,9f_p$ dan $f_b = 1,2f_p$. Untuk pengukuran FRF dengan eksitasi *three-step swept-sine*, dipilih waktu $T_a = 0,1T_r$ dan $T_b = 0,7T_r$. Dari pengukuran FRF dengan eksitasi *three-step swept-sine* diperoleh magnitudo FRF pada f_p yang lebih tinggi daripada magnitudo FRF pada f_p dari pengukuran FRF dengan eksitasi *linear swept-sine*. Perbandingan $|H_{111}(f)|$ terhadap $|H_{lin}(f)|$ ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Perbandingan $|H_{111}(f)|$ terhadap $|H_{lin}(f)|$ yang diperoleh dari pengukuran FRF batang kantilever dengan $L = 275$ mm, $b = 34$ mm, dan $h = 3$ mm.

Harga f_p yang diperoleh dari pengukuran FRF dengan eksitasi *three-step swept-sine* sama dengan harga f_p dari pengukuran FRF dengan *linear swept-sine* yaitu sebesar 31,5 Hz. Akan tetapi, $|H_{111}(f_p)|$ lebih tinggi dari $|H_{lin}(f_p)|$ dimana harga $|H_{111}(f_p)| = 228,2$ (m/s^2)/N.

4. KESIMPULAN

Pada simulasi eksitasi *three-step swept-sine* terhadap model sistem *SDOF* dengan $m = 1$ kg, $c = 2,26$ Ns/m, dan $k = 35.530,58$ N/m, kesalahan magnitudo FRF pada frekuensi resonansi yang diperoleh dibawah batas kesalahan maksimal yang diinginkan yaitu 4,22 %. Harga kesalahan ini lebih kecil daripada kesalahan magnitudo FRF pada frekuensi resonansi yang diperoleh dengan eksitasi *linear swept-sine* sebesar 14,32 %.

Metode pengontrolan eksitasi *shaker* dengan sinyal *three-step swept-sine* pada pengukuran FRF sistem nyata berupa sebuah batang kantilever menghasilkan magnitudo FRF yang lebih tinggi daripada pengontrolan eksitasi dengan sinyal *linear swept-sine*. Magnitudo FRF pada frekuensi resonansi dengan eksitasi *three-step swept-sine* diperoleh sebesar 228,2 (m/s^2)/N. Harga ini lebih tinggi daripada magnitudo FRF pada frekuensi resonansi dengan eksitasi *linear swept-sine* yaitu 179,6 (m/s^2)/N. Pada kasus sistem nyata, magnitudo FRF di frekuensi resonansi tidak dapat ditentukan. Dengan mengacu kepada hasil simulasi, semakin tinggi magnitudo FRF di frekuensi resonansi yang diperoleh mengindikasikan harga aktualnya. Dengan demikian,

metode eksitasi *three-step swept-sine* yang dikembangkan pada makalah ini terbukti dapat meningkatkan ketelitian magnitudo FRF yang sebelumnya diperoleh dengan eksitasi *linear swept-sine*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Peres, *et al.*, "Practical Aspects of Shaker Measurements for Modal Testing," in *Proceeding 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] G. Gloth and M. Sinapsis, "Analysis of Swept-Sine Runs During Modal Identification," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, pp. 1421-1441, 2004.
- [7] 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.
- [8] 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.