



Analisa *FRF* secara teoritik dan eksperimental pada komponen struktur dengan profil pelat aluminium akibat eksitasi kejut dan random

FRF analysis by theoretical and experimental on a structure of aluminum-plate due to exciter and random excitation

R. Arman

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta, Kampus III Jl. Gajah Mada No. 19, Olo Nanggalo, Padang 25143, SUMBAR, Indonesia. HP 085283044470.
E-mail: rizky.arman@bunghatta.ac.id

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 11 November 2019

Accepted 12 July 2020

Available online 1 October 2020

Keywords:

Experimental vibration

Frequency response function

Exciter and impact hammer



The dynamic behaviour of the vibration system in the experimental analysis is observed from the response to the stimulus acting on it. In this case, the relationship between the stimulus at a certain location and direction is specifically related to its response respectively. The relationship between stimulus and response is called the Frequency Response Function (FRF) or better known as the transfer function. In measuring the transfer function, the stimulus to the structure is given in the form of an excitation force while the vibration response measurement depends on the type of sensor or transducer used. Diverging from the above problems, vibration testing is carried out on a structural model. This test uses an Aluminum beam as a specimen by using an excitation signal that comes from an exciter and an impact hammer. This research aims to examine the dynamic response in the form of vibration characteristics response in the frequency spectrum of an Aluminum beam. Based on this spectrum maps, we can observe the dominant frequency (a frequency with large amplitude). Furthermore, from these frequency data, it is expected to determine which frequency components are derived from component element defects and indications of resonance frequencies on machine elements or noise originating frequencies.

Dinamika Teknik Mesin, Vol. 10, No. 2 Oktober 2020, p. ISSN: 2088-088X, e. ISSN: 2502-1729

1. PENDAHULUAN

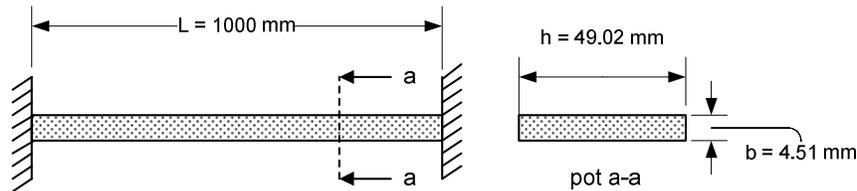
Peningkatan produktivitas memerlukan mesin dengan kecepatan tinggi pada pembebanan yang beragam. Oleh karena tuntutan tersebut maka beberapa bagian struktur atau komponen mesin dibuat seringan mungkin untuk mengurangi pengaruh inersia. Namun, sebagai akibatnya bagian atau

komponen tersebut tidak lagi kaku dan cenderung mengalami deformasi elastik selama dalam pembebanan dan pengoperasiannya. Kehadiran deformasi ini mengakibatkan parameter kekakuan batang berubah terhadap posisi, Chendkk.(2019).

Berangkat dari permasalahan diatas maka dilakukan pengujian getaran terhadap suatu model struktur. Pengujian ini menggunakan pelat (*beam*)aluminiumsebagai spesimen dengan menggunakan sinyal eksitasi yang berasal dari penggetar (*exciter*) dan palu pemukul (*impact hammer*). Sinyal respon berasal dari *accelerometer*, sedangkan sinyal gaya eksitasi berasal dari dua buah transduser gaya yang berbeda. Pemilihan spesimen pengujian dengan profil pelat aluminium ini merupakan salah satu usaha untuk menentukan data penunjang yang berguna untuk analisis lebih lanjut seperti, seiring dengan luasnya penggunaan struktur atau komponen mesin yang ringan namun tetap handal dan sesuai pada berbagai beban operasi yang relevan,Arman dkk.(2018).

Getaran umumnya diklasifikasikan berdasarkan: banyaknya derajat kebebasan yang dimiliki ($n = 1,2,3...∞$), ada atau tidak adanya gaya pengeksitasi dari luar, ada atau tidak adanya redaman serta linier atau tidak liniernya persamaan getaran. Pada pegujian ini spesimen yang digunakan dianggap homogen sehingga sistem getaran memiliki massa dan kekakuan yang terdistribusi merata dan kontinu serta memenuhi hukum *Hooke* di daerah elastiknya,Kenneth dkk.(2009).

Pengujian ini direncanakan dengan batasan dan dimensi seperti terlihat pada gambar 1. Untuk tumpuan jepit-jepit,Subhasmita (2019), dengan dimensi dan sifat beam (pelat) yang diketahui dengan pendekatan *properties* dari material aluminium, maka dapat ditentukan frekuensi pribadinya dimana dalam hal ini ditentukan 5 (lima) frekuensi pribadi pertamanya,Stender dkk.(2019).

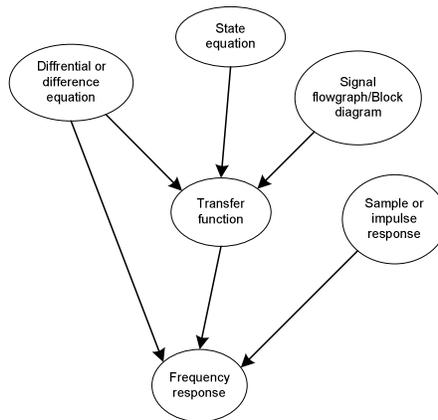


Gambar 1. Profil dan dimensi spesimen uji komponen struktur dengan profil pelat aluminium.

Untuk spesimen yang digunakan mempunyai modulus elastisitas, $E= 6.895 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$. Sedangkan massa, $m=0.656 \text{ kg}$. Maka rumus untuk menentukan frekuensi pribadi, ω_n adalah:

$$\omega_n = (\beta_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{M.L^4}} \tag{1}$$

Penentuan respon frekuensi dapat ditentukan dari beberapa model sistem atau kombinasi diantaranya. Pada pengujian ini bisa dikatakan menggunakan kombinasi model tersebut karena mencakup aspek perancangan awal sistem dan akuisisi data. Secara umum penentuan respon frekuensi dapat dilihat pada model sistem diagram gambar 2.



Gambar 2. Penentuan respon frekuensi dari berbagai model sistem.

Respon frekuensi getaran sebagai pernyataan dalam deret dari suatu fungsi waktu atau barisan spektrum dari fungsi barisan disebut sebagai transformasi Fourier. Spektrum dari suatu fungsi dapat diukur dengan menganalisis spektrum tersebut. Transformasi Fourier dari suatu fungsi $f(t)$ didefinisikan sebagai berikut:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{j\omega t} dt \quad (2)$$

Fungsi $F(j\omega)/2\pi$ disebut spektrum frekuensi dari $f(t)$, sehingga dapat ditulis dalam bentuk:

$$F(j\omega) = |F(j\omega)|e^{j\theta(j\omega)} \quad (3)$$

dengan $|F(j\omega)|$ adalah tanggapan amplitude dan $\theta(j\omega)$ merupakan tanggapan fasa. Kesimetrisan yang terdapat antara $f(t)$ dengan transformasinya $F(j\omega)$ merupakan sifat yang istimewa yang dimanfaatkan berulang kali. Konvolusi adalah suatu cara khusus untuk mencirikan hubungan masukan-keluaran dari sistem linear tak ubah waktu (LTI). Jika, $x(t) \leftrightarrow X(j\omega)$ dan $h(t) \leftrightarrow H(j\omega)$.

maka:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau \leftrightarrow Y(j\omega) = X(j\omega)H(j\omega) \quad (4)$$

Karena kita dapat mentransformasikan ekponensial kompleks maka kita dapat menyatakan suatu fungsi periodik dengan menggunakan integral Fourier sebagai:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega_0 t} \leftrightarrow F(j\omega) = 2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n \delta(\omega - n\omega_0) \quad (5)$$

Perhitungan numerik transformasi Fourier dari suatu bentuk gelombang waktu-kontinu $f(t)$ melibatkan dua proses pencuplikan. Untuk menghitung integral Fourier, maka kita harus menghampiri integral ini dengan suatu penjumlahan. Ini berarti bahwa $f(t)$ dinyatakan oleh sekumpulan cuplikan $f(kT)$, dimana:

$$F(e^{j\theta}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f_k e^{jk\theta} \quad (6)$$

Transformasi Fourier cepat adalah suatu urutan langkah (algoritma) yang digunakan untuk membandingkan DFT dan inversnya. Dengan menggunakan FFT maka jumlah perhitungan dapat kita kurangi secara dramatis. Penemuan FFT telah membuat perhitungan digital terhadap spektrum-spektrum frekuensi dapat diwujudkan dalam praktek. Dengan memilih barisan data N menjadi pangkat dua, maka adalah mungkin untuk mengurangi jumlah perkalian di dalam perhitungan DFT dari N^2 menjadi sekitar $N \log_2 N$. Sebagai contoh barisan yang panjangnya 4.096, $N = 2^{12}$, memerlukan 16.777.216 perkalian dengan menggunakan DFT secara langsung. Dengan menggunakan algoritma FFT jumlah perkalian dikurangi dengan faktor 341 menjadi sebanyak 49.152 perkalian. Algoritma apapun untuk menghitung F dari nilai barisan f dapat kita gunakan pula untuk menghitung f dari barisan F , kita hanya perlu mengalikan dengan $1/N$ dan mengubah tanda eksponen dalam penjumlahan Natili dkk.(2019).

2. METODE PENELITIAN

Sinyal getaran adalah suatu besaran listrik yang dihasilkan dari suatu pengukuran getaran. Melalui suatu instrument getaran maka akan dapat diperoleh sinyal getaran dari bagian yang bergetar yang merupakan representasi fisik dari informasi getaran. Sinyal getaran yang terukur biasanya berupa amplitudo atau level getaran, dan bila sinyalnya deterministik maka perioda sinyal bisa diukur. Jadi, dalam hal ini pemantauan getaran dilakukan dalam getaran tersebut (tidak dalam getaran mekanik), kemudian dikonversikan dalam besaran listrik (misal : tegangan listrik) agar pemantauan ataupun manipulasi sinyal seperti perbesaran, penyaringan, pengolahan dan lainnya bisa dilakukan lebih mudah.

Agar sinyal dapat diolah dengan teknik serta peralatan yang tersedia, maka perlu dinyatakan dalam suatu bentuk atau model yang benar. Pernyataan atau model matematik adalah penting untuk memulai analisis atau pengolahan suatu sinyal. Suatu sinyal sangat sering dinyatakan dalam bentuk gambar atau grafik, yang melukiskan bagaimana suatu informasi didalam sinyal tersebut berubah terhadap informasi lainnya. Hal ini yang terjadi pada pengukuran respon frekuensi. Dari bentuk sinyal (seperti sinyal kontinu atau sinyal diskrit), dalam praktek hampir tidak pernah digunakan sinyal kontinu dalam pengolahan dan analisis sinyal. Umumnya hanya akan dimanfaatkan sejumlah data terbatas yang diperoleh dari sinyal kontinu. Sinyal atau informasi yang diperoleh dari sinyal kontinu dikenal sebagai sinyal diskrit.

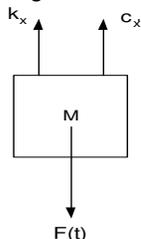
Pada dasarnya sinyal diskrit adalah sinyal yang diperoleh dari sinyal kontinu hanya pada waktu-waktu terbatas (waktu diskrit). Selang waktu diantara data pada sinyal diskrit adalah sebagai *sampling*. Bergantung pada perioda *sampling*, maka sinyal diskrit yang diperoleh dapat berbeda. Sesuatu yang penting untuk diperhatikan pada sinyal diskrit adalah telah terjadi kehilangan informasi relatif dari sinyal asli (sinyal kontinu), yaitu informasi diantara data diskrit yang diperoleh pada suatu proses diskritisasi. Makin panjang perioda sampling, makin banyak pula informasi yang hilang.

Pada pengolahan sinyal dengan komputer, yang digunakan bukan sinyal kontinu maupun diskrit, tetapi sinyal digital yang diperoleh dari proses kuantifikasi (digitasi) terhadap sinyal kontinu dengan menggunakan suatu perangkat yang dikenal sebagai *analog-to-digital converter* (A/D converter) atau lebih dikenal ADC. Terhadap sinyal yang tidak dikendaki (*noise*), maka dalam pengolahan sinyal dikenal *signal to noise ratio* (SNR). Makin kecil nilai SNR, makin sukar informasi diambil atau dipisahkan dari noise.

Dalam pengukuran getaran dari fungsi transfer, baik besaran stimulus maupun respon dinamik struktur karena stimulus tersebut, keduanya diukur secara simultan. Stimulus yang biasanya berupa gaya dinamik yang diukur oleh *load cell*, merupakan gaya eksitasi getaran yang bekerja pada struktur Hudan Cai, (2019). Gejala getaran yang terjadi pada struktur karena adanya gaya eksitasi getaran dapat dimodelkan sebagai:

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{f\}e^{i\omega t} \quad (7)$$

Metode eksitasi getaran ditinjau dari perangkat penggetarnya dapat dibedakan menjadi eksitasi dengan perangkat penggetar elektronik (tunggal dan jamak) serta eksitasi yang menggunakan palu pemukul. Perangkat instrumentasi dengan penggetar tunggal relatif tidak rumit dan mudah dalam pengoperasiannya. Pemakaian teknik eksitasi ini terbatas untuk struktur dinamik yang kecil, sehingga perbandingan antara sinyal respon dengan sinyal pengganggu (*noise*) relatif masih baik. Pada getaran yang tereksitasi seperti yang dilakukan pada pengujian ini, maka persamaan gerak sistemnya adalah:



$$mx + cx + kx = F_{eq} \sin \omega t \quad (8)$$

maka:

$$\frac{Xk}{F} = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} \quad (9)$$

Untuk sistem yang tidak ada peredam maka sudut fasanya, $\varphi = 0$, sedangkan responnya mengikuti fasa gaya eksitasi.

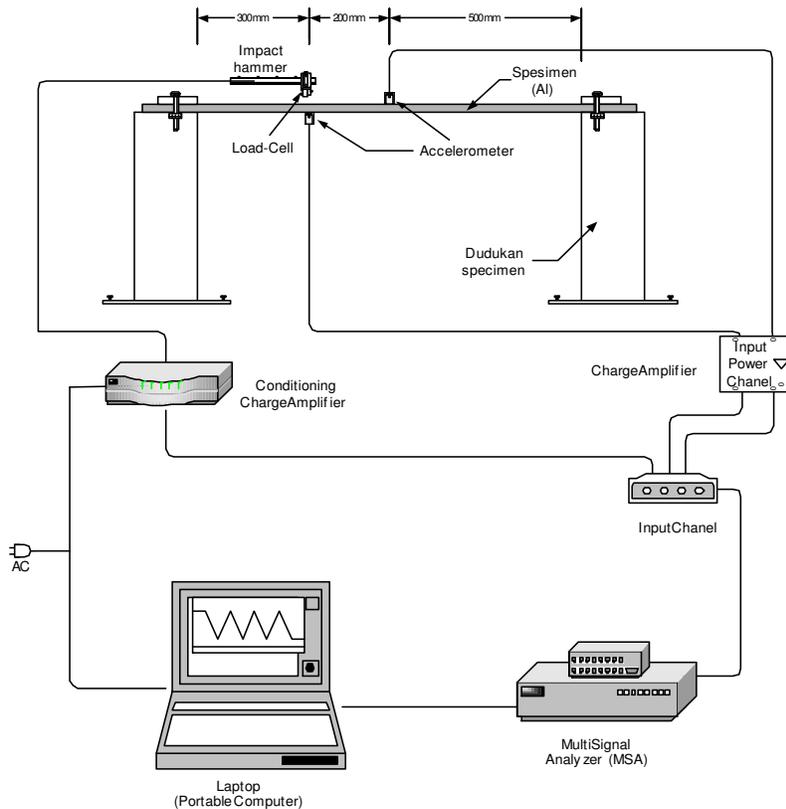
Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki respon dinamik berupa ciri getaran dalam domain (*spectrum*) frekuensi dari suatu komponen struktur. Berdasarkan peta *spectrum* ini dapat diamati frekuensi dominan (frekuensi yang amplitudonya besar). Frekuensi ini berasal dari elemen aktif yang

frekuensinya berubah sesuai dengan perubahan input beban (pengeksitasi). Selanjutnya dari data-data frekuensi tersebut diharapkan dapat menentukan mana yang termasuk komponen frekuensi yang berasal dari cacat elemen komponen serta indikasi dari frekuensi resonansi pada elemen komponen atau frekuensi yang berasal dari pengganggu (*noise*).

2.1 Pengukuran fungsi transfer dengan gaya eksitasi kejut

Model komponen struktur yang akan diuji dalam pengukuran ini adalah berupa *beam* (pelat) yang ditumpu sederhana jepit-jepit. Rancangan setup pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 3. Gaya eksitasi getaran berasal dari palu impact (*impact hammer*) yang dilengkapi dengan *load-cell piezoelectric*. Sinyal kejut analog yang dideteksi oleh *load-cell* dikondisikan oleh *conditioning charge-amplifier*. Adanya gaya eksitasi kejut pada beam mengakibatkan gejala getaran transien pada beam yang responnya dideteksi oleh *accelerometer*. Sinyal respon getaran analog ini dikondisikan oleh *input power channel (charge-amplifier)*.

Kedua sinyal output dari charge-amplifier ini masih dalam domain waktu dan bias dipantau secara bersamaan pada *Multi Signal Analyzer (MSA)*, sehingga diperoleh fungsi transfer beam pada posisi eksitasi dan posisi pengukuran respon yang tertentu. Dalam MSA, kedua sinyal tersebut diubah menjadi sinyal digital dan dengan menggunakan Transformasi Fourier Cepat (*Fast Fourier Transform*), Natili dkk. (2019), Santana (2014), kedua sinyal dikonversikan dalam domain frekuensi. Data yang berada dalam MSA diakses oleh *portable computer (laptop)*, yang telah dilengkapi *software* peng analisis data untuk keperluan analisis lebih lanjut.

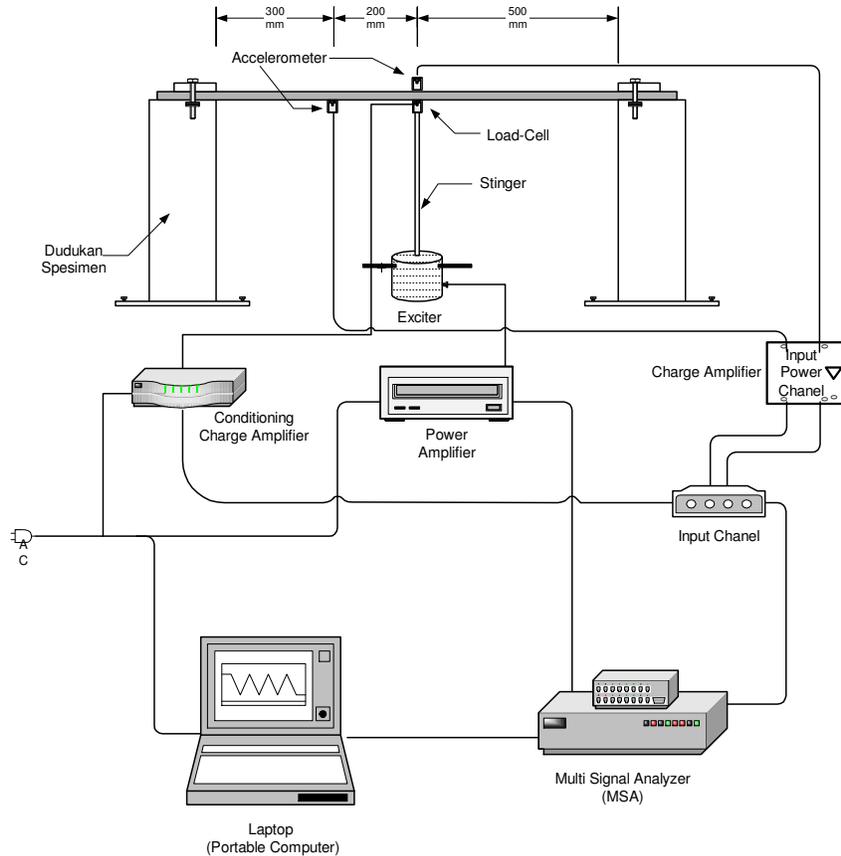


Gambar 3. Rancangan setup pengujian untuk metode pengukuran dengan gaya eksitasi kejut.

2.2 Pengukuran fungsi transfer dengan gaya eksitasi random

Model komponen yang akan diuji pada metode ini pada prinsipnya sama dengan eksitasi kejut. Gaya eksitasi berasal dari penggetar (*exciter*) yang telah dilengkapi dengan *load-cell*. Sinyal random berasal dari *power amplifier* yang dilengkapi dengan penguat (pengatur tegangan) input *exciter*. Besar penguatan ini dapat dipantau melalui ampere-meter. Proses pemantauan alur sinyal selanjutnya untuk metode eksitasi random ini adalah sama dengan metode eksitasi kejut. Pengukuran

fungsi transfer dengan eksitasi kejut maupun eksitasi random, biasanya dilengkapi dengan pengukuran fungsi koherensi. Fungsi ini berguna untuk mengetahui seberapa besar pengaruh sinyal pengganggu terhadap fungsi transfer hasil pengukuran. Subhasmita(2019), Wei dan Zivanovi (2018) Rancangan setup pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Rancangan setup pengujian untuk metode pengukuran dengan gaya eksitasi random.

Dalam pengukuran fungsi transfer maupun pengukuran spektrum frekuensi, peranan penganalisa spektrum (*Spectrum Analyzer: Multi Signal Analyser*) sangat penting karena proses transformasi sinyal getaran dari domain waktu ke domain frekuensi dilakukan oleh instrumen ini. Data yang diperoleh dari penganalisa spektrum tersebut bisa berupa data : amplitudo, frekuensi dan fasa yang disajikan dalam bentuk spektrum frekuensi dan spectrum fasa. Data lainnya yang melibatkan dua sinyal adalah berupa : fungsi transfer, fungsi koherensi, fasa dan lainnya. Penganalisa spektrum MSA menggunakan konsep pengolahan data secara digital, Natili dkk.(2019); Pellicano dkk. (2019), Stender dan Oberst(2019). Proses konversi sinyal dari daomian waktu ke dalam domain frekuensi menggunakan metoda Transformasi Fourier Cepat (FFT), dan data hasil konversi bisa dimanipulasi secara matematik sehingga misalnya data bisa disajikan dalam skala linear ataupun dalam skala logaritmik.

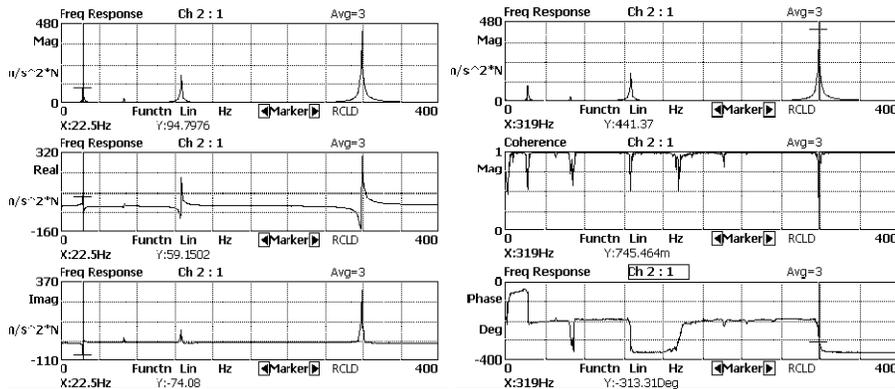
Proses konversi berlangsung relatif cepat (dalam order milisecond) dan penganalisa spektrum ini bisa dihubungkan dengan komputer dengan GPIB (*General purpose Interface Bus*), sehingga proses pengukuran dan pengolahan data bisa dikontrol oleh komputer. Dengan kemampuan yang disebutkan diatas, maka MSA cocok untuk digunakan dalam analisis getaran maupun diagnosis kerusakan pada elemen rotasi. Penganalisa spektrum MSA selalu dilengkapi dengan low-pass-filter untuk mencegah terjadinya kesalahan aliasing (tumpang tindih atau pelipatan frekuensi) pada hasil konversi data domain waktu menjadi data domain frekuensi. Setelah itu dilakukan proses pencuplikan dan konversi sinyal analog menjadi sinyal digital yang keduanya dalam domain waktu, Abolfathi dkk.(2017), Chen dkk.(2019), Chen dkk.(2014).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari grafik FRF, hasil pengujian menemukan bahwa hanya 4 puncak sinyal yang dicurigai sebagai frekuensi alami dalam rentang 400 Hz, sementara secara teoritis ada 5 frekuensi alami. Kurva FRF ini diperoleh dengan prosedur sebagai berikut:

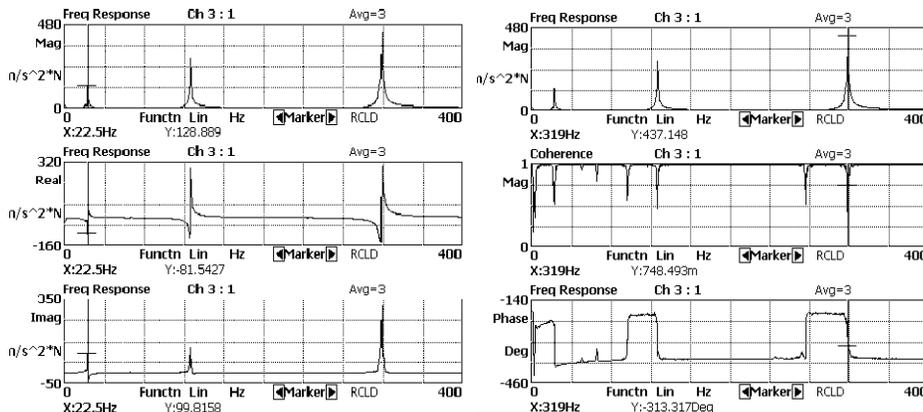
(1) Sinyal stimulus yang digunakan adalah random kontinu dengan pertimbangan waktu pengukuran yang relatif cepat, mengurangi efek non-linearitas dan rasio sinyal input terhadap sinyal noise yang cukup baik. (2) Untuk mencegah kebocoran spektrum dari sinyal stimulus yang digunakan, jendela Hanning dipilih. Menggunakan jendela ini menghasilkan sinyal input dalam domain waktu yang mengalami pengurangan pada awal dan akhir sedemikian rupa sehingga sinyal input terlihat berkala sehingga menghasilkan data dengan frekuensi yang lebih baik daripada jendela lain. (3) Untuk meningkatkan keakuratan statistik sinyal reguler sehingga diperoleh bentuk kurva yang lebih akurat, rata-rata digunakan dengan jenis *leveling* yang stabil (menjumlahkan aritmatika sinyal input dan kemudian membaginya sesuai dengan jumlah perataan yang dipilih). Untuk menguatkan dugaan bahwa empat puncak adalah frekuensi alami, kita dapat menentukannya berdasarkan kurva FRF nyata dan imajiner seperti yang ditunjukkan pada sensor ch. 2 pada Gambar 5. Dalam hal ini, grafik komponen nyata dan imajiner memberikan informasi berikut:

a). Sebuah penggambaran komponen nyata dari fungsi transfer menunjukkan bagian positif dan negatif. Perpotongan antara grafik komponen nyata dan absis (sumbu frekuensi) adalah frekuensi yang harga riilnya nol. b). Gambar komponen imajiner menunjukkan amplitudo maksimum pada frekuensi di mana nilai sebenarnya adalah nol. c). Frekuensi alami adalah frekuensi yang memenuhi persyaratan tersebut dalam item (a) dan (b).



Gambar 5. Respon frekuensi pada sensor ch. 2

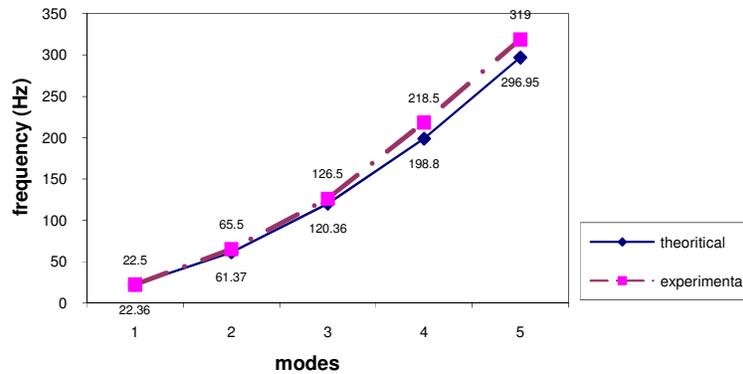
Di sisi lain, dengan metode yang sama seperti yang digunakan pada sensor ch. 2, respons frekuensi yang diperoleh pada sensor ch. 3 menunjukkan bahwa hanya ada 3 puncak sinyal yang diasumsikan sebagai frekuensi alami dari sistem. 3 puncak sinyal memiliki nilai frekuensi yang terkait dengan titik sensor 2 (lihat Gambar 6)



Gambar 6. Respon frekuensi pada sensor ch. 3
Tabel 1. Data frekuensi pribadi: *theoretical and experimental*

5 first natural frequency, ω_n	Theoretical	Experimental	
		Sensor #2	Sensor#3
ω_1	22.36 Hz	22.5 Hz	22.5 Hz
ω_2	61.37 Hz	65.5 Hz	65.5 Hz
ω_3	120.36 Hz	126.5 Hz	unreadable
ω_4	198.8 Hz	unreadable	218.5 Hz
ω_5	296.95 Hz	319 Hz	319 Hz

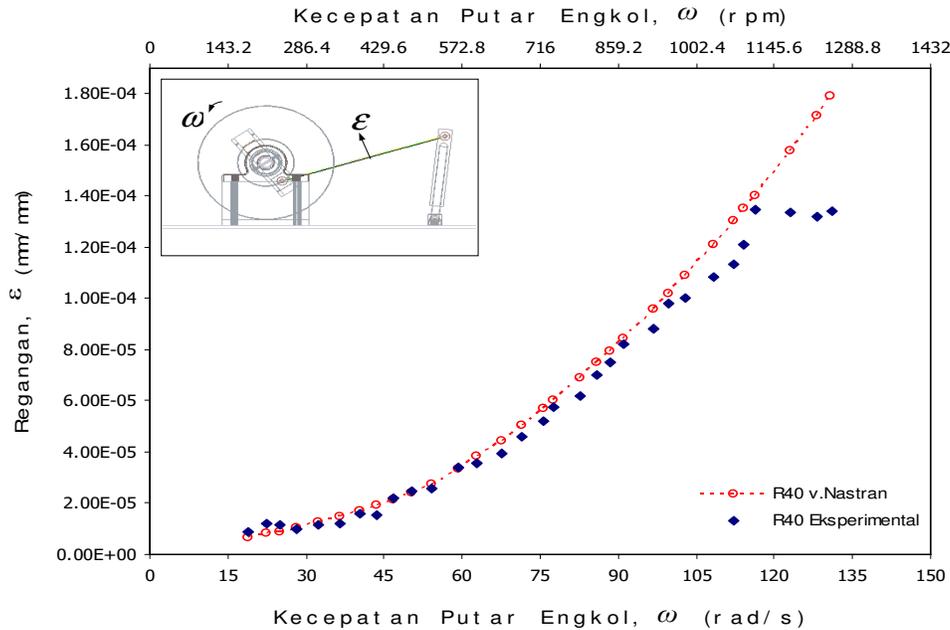
Metode lain untuk menentukan frekuensi alami adalah dengan melihat grafik koherensi dari grafik respons frekuensi. Fungsi koherensi tidak disatukan dan nilainya antara 0 dan 1. Fungsi koherensi 0 berarti bahwa tidak ada hubungan antara sinyal input dan sinyal output, sedangkan jika nilainya 1, sinyal input terkait dengan sinyal output. Jadi jika respons frekuensi puncak sama dengan atau mendekati 1, maka kita dapat mengasumsikan bahwa nilai puncak adalah frekuensi alami, Langer dkk.(2018). Jika koherensi bernilai antara 0 dan 1 berarti sinyal output memiliki sinyal noise. Selain itu, dari grafik fase ke respons frekuensi (diagram pertanda), dapat juga dilihat bahwa pada puncak yang merupakan kurva 90 derajat atau kelipatan pada grafik fase, kita dapat mengasumsikan bahwa nilai puncak adalah frekuensi alami, Arman dkk. (2018). Dari hasil yang diperoleh dari tes, dapat dilihat bahwa perbandingan nilai frekuensi alami teoritis dengan tes adalah seperti yang ditunjukkan pada tabel 1 dan gambar 7.



Gambar 7. Nilai frekuensi pribadi untuk 5 modus pertama: *theoretical and experimental*

Sedangkan pada pengujian yang dilakukan sebelumnya pada profil spesimen yang relatif sama terhadap respon regangan untuk mekanisme empat batang memberikan hasil yang juga tidak terlalu signifikan berbeda. Hasil plot kurva regangan maksimum untuk setiap radius engkol memberikan nilai yang fluktuatif pada kecepatan minimum hingga maksimum pengujian yang dilakukan. Nilai yang fluktuatif ini berhubungan dengan resonansi subharmonis dari frekuensi pribadi pertama batang hubung. Fenomena ini juga ditemukan pada penelitian yang dilakukan, Arman dkk. (2018), pada mekanisme *slider-crank*. Secara umum dari kurva tersebut menunjukkan bahwa semakin besar radius engkol maka akan cenderung semakin berkurang resonansi subharmonis yang terjadi dalam *range* kecepatan putar engkol pengujian yang dilakukan, sepanjang masih dalam batas elastisitas dan kecepatan putar engkol tidak melebihi frekuensi pribadi pertama dari batang hubung. Secara simulasi didapatkan hasil respon regangan maksimum terhadap waktu yang menggambarkan distribusi regangan pada permukaan atas dan bawah dari batang hubung pada masing-masing variasi pengujian. Dari hasil secara visual tersebut tampak bahwa pertumbuhan regangan pada permukaan atas dari batang hubung mulai terjadi pada sekitar 1/3 periode dan puncaknya pada 1/2 periode, Langer dkk. (2018) dengan kecepatan putar engkol sekitar 500 rpm untuk radius engkol 10 mm. Atau jika dilihat dari grafik regangan maksimum terhadap posisi (sudut) engkol, maka puncak pertumbuhan regangan pada permukaan atas tersebut terjadi pada saat posisi engkol sekitar 200 derajat. Pertumbuhan regangan pada permukaan atas ini akan lebih awal terjadi

pada kecepatan putar engkolnya seiring dengan bertambahnya panjang radius engkol, seperti tampak pada gambar 8.



Gambar 8. Komparasi regangan maksimum pada mekanisme empat batang secara simulasi teoritik dengan eksperimental.

4. KESIMPULAN

Dari pengujian fungsi respon frekuensi (FRF) dengan eksitasi kejut masih didapati beberapa frekuensi puncak sinyal tidak terlihat. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa hal, termasuk kemungkinan ketelitian pemasangan atau penempatan sensor yang kurang presisi serta pemilihan rentang sinyal stimulus dan jendela yang digunakan belum menjangkau semua sinyal eksitasi untuk pengujian yang dilakukan. Sedangkan untuk sinyal stimulus dengan eksitasi *random* terus menerus dengan jendela Hanning yang digunakan memiliki beberapa kelemahan kecil termasuk amplitudo walaupun tidak sepenuhnya akurat. Selain itu, waktu pengujian yang terbatas ketika pengaturan alat cukup panjang menyebabkan terjadinya keterbatasan sampling sehingga pengukuran dengan berbagai variasi sinyal stimulus dan jendela yang digunakan menjadi terbatas hanya satu variasi untuk setiap tes. Secara umum, baik teoritis dan eksperimental, nilai alami dari respon frekuensi yang diperoleh tidak berbeda secara signifikan. Ini menunjukkan bahwa jika metode eksperimental yang dilakukan dapat menjadi referensi untuk menentukan FRF melalui exciter dari struktur elemen mesin.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis pada kesempatan ini mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu baik berupa materi maupun pikiran sehingga penelitian dan paper ini dapat terselesaikan. Selanjutnya penulis mengucapkan terimakasih kepada LAB PAU ITB atas semua fasilitas yang dipergunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abolfathi A., Boy D.J.O., Walsh S. J., Fisher S.A., 2017, Investigating the sources of variability in the dynamic response of built-up structures through a linear analytical model, *Journal of Sound and Vibration*, 387, 163–176.
- Arman R., Mahyuddin A.I., Marthiana W., Satria I., 2018, Experimental investigation of vibration response of a flexible coupler in a four bar mechanism due to varying crank length and crank speed, *MATEC Web of Conferences*, 248.

- Chen L., Shi W., Chen Z., 2019, Modeling and experimental study on dynamic characteristics of dual-mass flywheel torsional damper, *Hindawi Shock and Vibration*, 1-13.
- Chen X., Omenzetter P., Beskhyroun S., Zealand N., 2014, Ambient vibration testing , system identification and model updating of a multiple-span elevated bridge, *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2014*, 2377–2384.
- Kenneth G., McConnell P.S.V., 2009, *Vibration testing: theory and practice*, (2nd Edition), WILEY.
- Langer P., Sepahvand K., Guist C., Bär J., Peplow A., Marburg S., 2018, Matching experimental and three dimensional numerical models for structural vibration problems with uncertainties, *Journal of Sound and Vibration*, 417, 294–305
- Langer P., Sepahvand K., Guist C., Marburg S., 2017, Sciencedirect finite finite element element modeling modeling for for structural structural dynamic dynamic analysis analysis of of bolted bolted joints under uncertainty joints under uncertainty, *Procedia Engineering*, 199, 954–959.
- Liu X., Hu Y., Cai M., 2019, Free vibration analysis of transmission lines based on the dynamic stiffness method, *Royal Society Open Science*, 1-28.
- Natili F., Castellani F., Astolfi D., Becchetti M., 2019, Experimental and signal processing techniques for fault diagnosis on a small horizontal-axis wind turbine generator, *Vibration*, 2, 187–200.
- Pellicano F., Strozzi M., Avramov K. V., 2019, Nonlinear vibration of continuous systems.
- Santana G., 2014, Evaluation of the effects of dynamic excitation characteristics on ambient vibration test results for a multi-girder bridge, Thesis, Civil Engineering, University of Arkansas, Fayetteville.
- Stender M., Oberst S., 2019, Recovery of differential equations from impulse response time series data for model identification and feature extraction, *Vibration*, 25–46.
- Subhasmita P., 2019, vibration analysis of simply supported beam with varying crack depth and location by using ANSYS, *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 2(7), 73-88.
- Wei X., Zivanovi S., 2018, Frequency response function-based explicit framework for dynamic identification in human-structure systems, *Journal of Sound and Vibration*, 422, 453–470.