

Dynamical Characteristics of a Head Expander for Vibration Testing In Pustekbang Laboratory

Nur Mufidatul Ula^{1,*}, Yusuf Giri Wijaya², Muksin³, Mikhael Gilang P.P.P⁴, Agus Harno Nurdin Syah⁵
^{1,2,3,4,5} Pusat Teknologi Penerbangan, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Email Korespondensi: *Nur.mufidatul@lapan.go.id

Received: 13 Oktober 2020; Accepted : 28 Oktober 2020; Published : 1 November 2020

ABSTRAK

Pengujian getaran terhadap head expander telah dilaksanakan. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik dinamis dari head expander yang digunakan pada Laboratorium Uji Suhu dan Vibrasi Pusat Teknologi Penerbangan-LAPAN. Head expander digunakan sebagai alat bantu pengujian untuk kebutuhan benda uji yang besar. Validasi head expander melalui metode eksperimental ini bertujuan untuk mengetahui tingkat homogenitas head expander. Pengambilan data menggunakan 4 buah akselerometer yang ditempatkan pada setiap ujung head expander. Getaran sine sweep diberikan mulai dari 5 Hz sampai 2000 Hz dengan amplitudo konstan sebesar 1g dan sweep rate sebesar 1 octave/minute. Hasil pengujian menunjukkan bahwa head expander memiliki sifat homogen dengan nilai frekuensi alami yang tidak berbeda jauh. Resonansi terjadi pada frekuensi 900 Hz, 1300 Hz, 1600 Hz dan 1900 Hz. Nilai amplitudo terbesar dengan nilai 11,76 g terjadi pada frekuensi 1900 Hz, sehingga head expander ini tidak dapat digunakan untuk pengujian diatas 1900 Hz.

Kata Kunci : Head expander, Jig uji, Frekuensi alami, Getaran, Akselerometer.

ABSTRACT

Vibration testing of the head expander has been carried out. This test aims to determine the dynamic characteristics of the head expander that used in the Laboratory of Temperature and Vibration Testing, The Aeronautics Technology-LAPAN. The Head expander is used as a testing tool for the needs of large specimens. Validation of the head expander through this experimental method aims to determine the level of homogeneity of the head expanders. Retrieval of data using 4 accelerometers that are placed at each end of the head expanders. Sine sweep vibrations are given from 5 Hz to 2000 Hz with a constant amplitude of 1g and a sweep rate of 1 octave/minute. The test results show that the ends of the head expander have homogeneous properties with natural frequency values that do not differ much. Resonance occurs at a frequency of 900 Hz, 1300 Hz, 1600 Hz and 1900 Hz. The largest amplitude value at 11,76 g occurs at a frequency of 1900 Hz, so this head expander cannot be used for tests above 1900 Hz.

Keyword: Head expander, Test fixture, Natural frequency, Vibration, Accelerometer.

1. PENGANTAR

Pengujian getaran merupakan sebuah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik dinamik dari sebuah struktur atau benda [1]. Selain untuk mengetahui karakteristik dinamik dari sebuah benda, pengujian getaran juga bisa digunakan untuk mengetahui kekuatan struktur saat dikenai getaran secara kontinyu [2]. Secara tidak langsung, getaran atau noise pada pesawat sangat berpengaruh pada perambatan tekanan dan retakan yang bisa mengakibatkan kerusakan atau kegagalan pada struktur pesawat [3]. Saat ini penelitian dan pengembangan pesawat tanpa awak maupun pesawat penumpang komersil masih terus dilakukan oleh Pusat Teknologi Penerbangan-LAPAN. Salah satu kegiatan pengembangan dan penelitian yang penting dilakukan dalam pengembangan pesawat adalah uji getaran. Seperti yang telah dilakukan pada penelitian-penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa banyak kerusakan yang terjadi kepada setiap benda karena pengaruh adanya getaran. Kita telah ketahui bersama bahwa pesawat memiliki sumber-sumber getaran dimana ini akan berpengaruh pada kinerja pesawat itu sendiri. Sumber getaran utama pada pesawat ditimbulkan oleh sistem propulsi terutama saat pesawat melakukan lepas landas, termasuk saat penyalakan mesin dan *steady state operation* [4]. Sumber getaran lainnya bisa ditimbulkan juga oleh sumber-sumber dari alam seperti getaran akibat turbulensi dan lain sebagainya [5].

Dengan mempertimbangkan beberapa struktur atau bagian pada pesawat yang memiliki ukuran lumayan besar, sedangkan ukuran dari *armateur* pada alat uji getaran hanya memiliki luasan yang terbatas maka perlu *head expander* tambahan untuk mengakomodir kebutuhan sampel yang besar tersebut. *Head expander* berfungsi sebagai tempat diletakkannya benda uji khususnya yang berukuran besar. Selain itu, *head expander* juga berfungsi untuk menyalurkan energi dalam bentuk getaran dari alat uji getaran ke benda uji [6]. Input getaran yang diberikan pada *Head expander* sebisa mungkin tidak berubah saat diteruskan pada benda uji, oleh karenanya *Head expander* haruslah sekaku mungkin sehingga tidak menyebabkan resonansi

[1]. *Head expander* juga harus seringan mungkin karena semakin kaku dan semakin kecil massa sebuah benda maka frekuensi natural dari benda tersebut akan semakin besar [7]. Penggunaan *head expander* dalam pengujian haruslah divalidasi terlebih dahulu. Salah satu cara yang dilakukan untuk melakukan validasi sebuah *head expander* adalah dengan pengujian atau pengambilan data secara experimental. Pengujian sangat penting dilakukan untuk mengetahui level getaran pada permukaan *head expander* agar mendapatkan gambaran batas frekuensi pengujian yang diijinkan [8].

Pada pengujian *head expander* ada beberapa parameter yang perlu diketahui yakni frekuensi natural dan tingkat Homogenity *head expander*. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui dan memvalidasi performa dinamis dari *Head expander* yang telah dibuat. Verifikasi ini dilakukan agar peneliti memiliki gambaran mengenai rentang frekuensi serta batasan-batasan lainnya yang bisa dilakukan dengan baik oleh *head expander* yang ada di Laboratorium Suhu dan Vibrasi Pustekbang-LAPAN. Pada penelitian kali ini, validasi dilakukan terhadap sifat homogenitas *head expander*. Menjelaskan kronologis penelitian, meliputi desain penelitian, prosedur penelitian (dalam bentuk algoritma, pseudocode atau lainnya), cara pengujian dan perolehan data [1-3]. Uraian jalannya penelitian harus didukung referensi, sehingga penjelasannya dapat diterima secara ilmiah [2, 4]. Tabel dan Gambar disajikan di tengah, seperti yang ditunjukkan di bawah ini dan dikutip dalam manuskrip.

2. METODE PENELITIAN

Proses Penelitian dan pengujian dilakukan di Laboratorium Suhu dan Vibrasi Pusat Teknologi Penerbangan, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional.

2.1. Perangkat Pengujian

A. Shaker

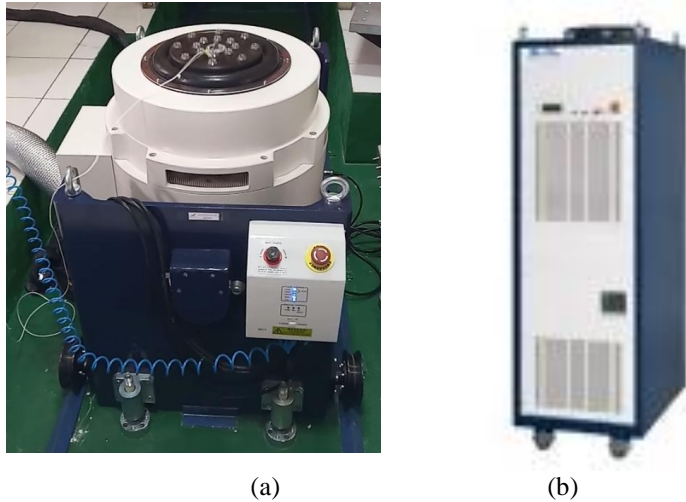
Dalam proses pengujian, Shaker yang digunakan diproduksi oleh ETS Solutions (Beijing) Ltd lihat pada gambar 1 (a) dengan spesifikasi teknis pada table 1.

Tabel 1. Spesifikasi Shaker yang digunakan dalam penelitian [9]

Type	M124M	Armature Material	Magnesium (M)
Sine Force	1.000 kgf	Effective Armature Mass	10 kg
Random Force	1.000 kgf	Load Attachment Points	M10
Shock Force (6ms)	2.000 kgf	Armature Insert Pattern	8 on 100 mm 8 on 200 mm
Useful Frequency Range	DC to 4.000 Hz	First Resonant Fre. ±5%,bare table	3.600 Hz
Continuos Displacement	51 mm	Max Static Payload	140 kg
Shock Displacement	51 mm	Natural frequency thrust axis	< 5 Hz
Max Velocity (sine)	1,8 m/s	Stray Flux Density	< 10 gauss
Max Acceleration (sine)	981 m/s ² (100g)	Dimensions uncreated (WxDxH)	1061 x 730 x 784 mm
Armature Diameter	240 mm	Shaker weight uncreated	960 kg

B. Amplifier

Amplifier berfungsi sebagai sumber daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan shaker. Dalam proses pengujian amplifier dan shaker haruslah kompatibel satu dengan yang lainnya agar tidak terjadi kerusakan. Amplifier yang digunakan di Laboratorium suhu dan vibrasi dibuat juga oleh ETS Solutions (Beijing) Ltd dengan nomor seri MPA403. Amplifier ini memiliki 3 buah sub-modul dengan rate power output sebesar 13 kVA, rate output voltage sebesar 120 Vrms dan rated output current sebesar 108Arms. Amplifier memiliki berat sebesar 420 kg dengan dimensi 500x800x1850 (mm). Amplifier terdiri dari 1 filling cabinet seperti pada gambar 1(b).



Gambar 1. (a) Shaker M124M, (b) Power Amplifier MPA403

C. Kontroler dan sistem data akuisi

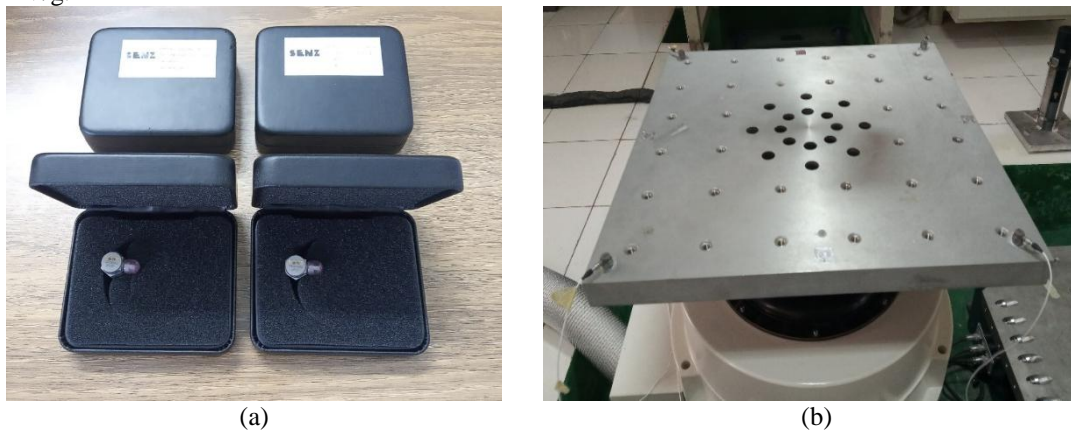
Pada proses pengujian, Kontroler dan Sistem data akuisi yang digunakan adalah Vibration Research dengan tipe Medallion II VR9500. Kontroler dan sistem data akuisi ini memiliki 4 chanel dengan 1 channel digunakan sebagai kontroler dan 3 channel lainnya digunakan sebagai input respon. Modul pengujian yang dapat digunakan pada kontroler dan sistem data akuisi ini berupa sinus, random, shock, sinus on random, sinus on sinus, random on random dan beberapa modul pengujian lain.



Gambar 2. Medallion II VR9500

D. Accelerometer

Sensor *accelerometer* yang digunakan pada saat pengujian merupakan produk dari SENZ dengan part number SZ3055B2. Sensor yang digunakan berjumlah 4 buah yang diletakkan pada ujung disetiap sisi-sisi *Head expander*. Sensor yang digunakan merupakan jenis sensor accelerometer IEPE satu axis/satu arah. Dengan masing-masing sensor memiliki sensitivty sebesar 98,39 mV/g, 97,67 mV/g, 98,74 mV/g, dan 97,14 mV/g.

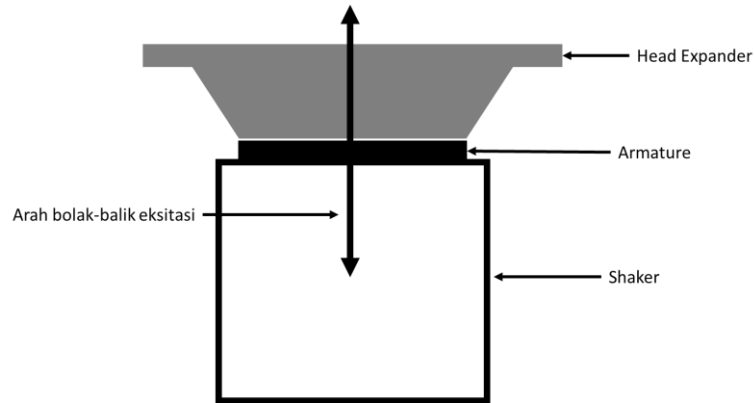


Gambar 3. (a) Accelerometer SENZ SZ3055B2, (b) Head expander dan peletakan akselerometer diatasnya

E. *Head expander*

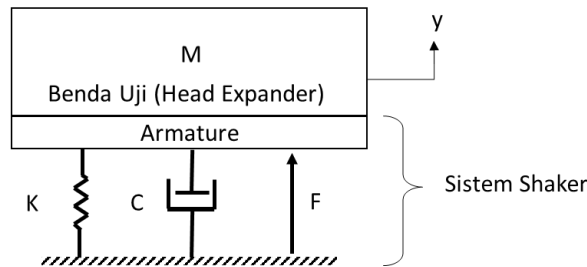
Head expander yang sedang dilakukan penelitian serta pengambilan data terbuat dari material aluminium (Al). Model *Head expander* adalah HE600SQA-240 dengan luasan atas sebesar 600 x 600 mm. Berat dari *head expander* yang terdapat di laboratorium suhu dan vibrasi yakni 45 kg. Berdasarkan klaim pabrikan, Range frekuensi yang bisa diterapkan pada HE ini adalah 5-2000 Hz. Penerapan frekuensi ini nantinya bergantung pada massa sampel uji yang akan diuji saat harus menggunakan HE ini.

2.2. **Pemodelan Fisis Pengujian**



Gambar 4. Diagram Sistem Pengujian

Head expander dipasangkan pada *armature* dari *shaker* menggunakan *bolt* dan diberi eksitasi naik-turun sebesar 1G seperti pada Gambar 4. Sambungan antara *armature* dengan *head expander* diasumsikan rigid sehingga permasalahan dapat disederhanakan menjadi sistem gerak satu derajat kebebasan dengan kondisi batas *fixed* pada bagian dasar seperti yang digambarkan pada Gambar 5. Dimana *M* adalah massa, *K* adalah modulus kekakuan, *C* adalah koefisien redam dan *F* adalah gaya, serta *y* adalah perpindahan arah pada sumbu *y*.



Gambar 5. Simplifikasi Sistem Pengujian

Persamaan kesetimbangan gerak sebuah sistem pada gambar 5 dapat dituliskan dalam bentuk matematis sebagai berikut:

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F(t) \tag{1}$$

Shaker memberi eksitasi dengan amplitudo F_A dan frekuensi Ω

$$F(t) = F_A \sin \Omega t \tag{2}$$

Sehingga persamaan kesetimbangan dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F_A \sin \Omega t \tag{3}$$

Sehingga solusinya dapat diperoleh dengan dalam bentuk

$$y = B \sin \Omega t + C \cos \Omega t \tag{4}$$

Setelah disubsitusikan pada persamaan kesetimbangan (4) sehingga diperoleh persamaan untuk B dan C sebagai berikut:

$$B = \frac{(\omega^2 - \Omega^2)(F_A/m)}{(\omega^2 - \Omega^2)^2 + 4\omega^2\Omega^2\zeta^2} \tag{5}$$

$$C = \frac{-2\omega\Omega\zeta(F_A/m)}{(\omega^2 - \Omega^2)^2 + 4\omega^2\Omega^2\zeta^2} \tag{6}$$

Dengan ω adalah frekuensi natural dan ξ adalah koefisien redaman. Benda uji yang dieksitasi akan mengeluarkan gaya respon terhadap fungsi waktu $R(t)$ yang secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$R(t) = R_A \sin(\Omega t - \phi) \quad (7)$$

Dengan amplitudo respon R_A :

$$R_A = \frac{(F_A/k)}{\{[1 - (\Omega/\omega)^2]^2 + 4\zeta^2(\Omega/\omega)^2\}^{1/2}} \quad (8)$$

dan pergeseran fasa ϕ diperoleh dari:

$$\tan \phi = \frac{2\zeta(\Omega/\omega)}{1 - (\Omega/\omega)^2} \quad (9)$$

Amplitudo respon R_A dapat ditulis dalam bentuk factor magnifikasi M sebagai berikut:

$$R_A = M(F_A/k) \quad (10)$$

dengan faktor magnifikasi M :

$$M = \frac{1}{\{[1 - (\Omega/\omega)^2]^2 + 4\zeta^2(\Omega/\omega)^2\}^{1/2}} \quad (11)$$

Faktor magnifikasi adalah sebuah faktor yang menggambarkan rasio antara amplitudo gaya respon dengan amplitudo gaya eksitasi. Apabila redaman diperhitungkan, maka akan terjadi pergeseran fasa atau delay. Pergeseran fasa menyebabkan fasa gaya eksitasi yang diterima oleh benda uji berbeda dengan fasa gaya eksitasi dari shaker. Gaya yang sampai ke benda uji karena keberadaan peredam $P(t)$ dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$P(t) = P_A \sin(\Omega t - \phi + \delta) \quad (12)$$

Dengan amplitudo P_A

$$P_A = TF_A \quad (13)$$

Nilai transmissibility (T) secara matematis bisa dituliskan sebagai berikut [10]:

$$T = \left\{ \frac{1 + (2\zeta\Omega/\omega)^2}{[1 - (\Omega/\omega)^2]^2 + [2\zeta(\Omega/\omega)]^2} \right\}^{1/2} \quad (14)$$

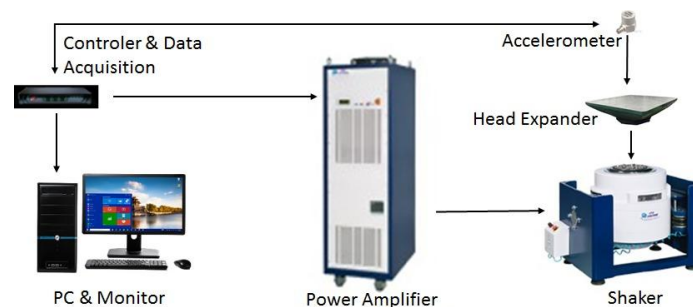
Dengan nilai pergeseran fasa akibat redaman dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$\tan \delta = 2\zeta\Omega/\omega \quad (15)$$

2.3. Proses pengujian

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen dengan melakukan pengujian dan pengambilan data pada *head expander* yang diberi perlakuan getaran. Pengujian *head expander* dilakukan untuk mengetahui karakteristik dinamisnya berupa nilai dari frekuensi alaminya dan sifat kehomogenitasnya. Nilai frekuensi alami dari *head expander* harus diatas dari rentang nilai frekuensi yang digunakan untuk pengujian. Jenis uji getaran yang dilakukan adalah sine sweep. Getaran sine sweep yang diberikan dimulai dari frekuensi 5 Hz sampai 2000 Hz sesuai dengan klaim pabrikan terkait kemampuan *head expander* dengan amplitudo yang konstan sebesar 1g. Nilai dari sweep rate yang diberikan yaitu sebesar 1 octave/minute.

Selama pengujian besarnya getaran yang terjadi pada *head expander* diukur menggunakan 4 sensor accelerometer yang diletakkan masing-masing di ujung *head expander*. 1 akselerometer digunakan sebagai kontrol dan tiga lainnya digunakan sebagai sinyal respon. Posisi sensor yang dijadikan sebagai kontrol dibuat 4 variasi untuk mengetahui sifat kehomogenitasan pada *head expander* tersebut. *Head expander* bersifat homogenitas jika pada saat posisi sensor yang dijadikan sebagai kontrol dipindah – pindah maka nilai frekuensi alaminya masih tetap pada rentang yang sama atau terjadi perubahan yang tidak terlalu besar. Peletakan accelerometer dapat dilihat pada gambar 4.

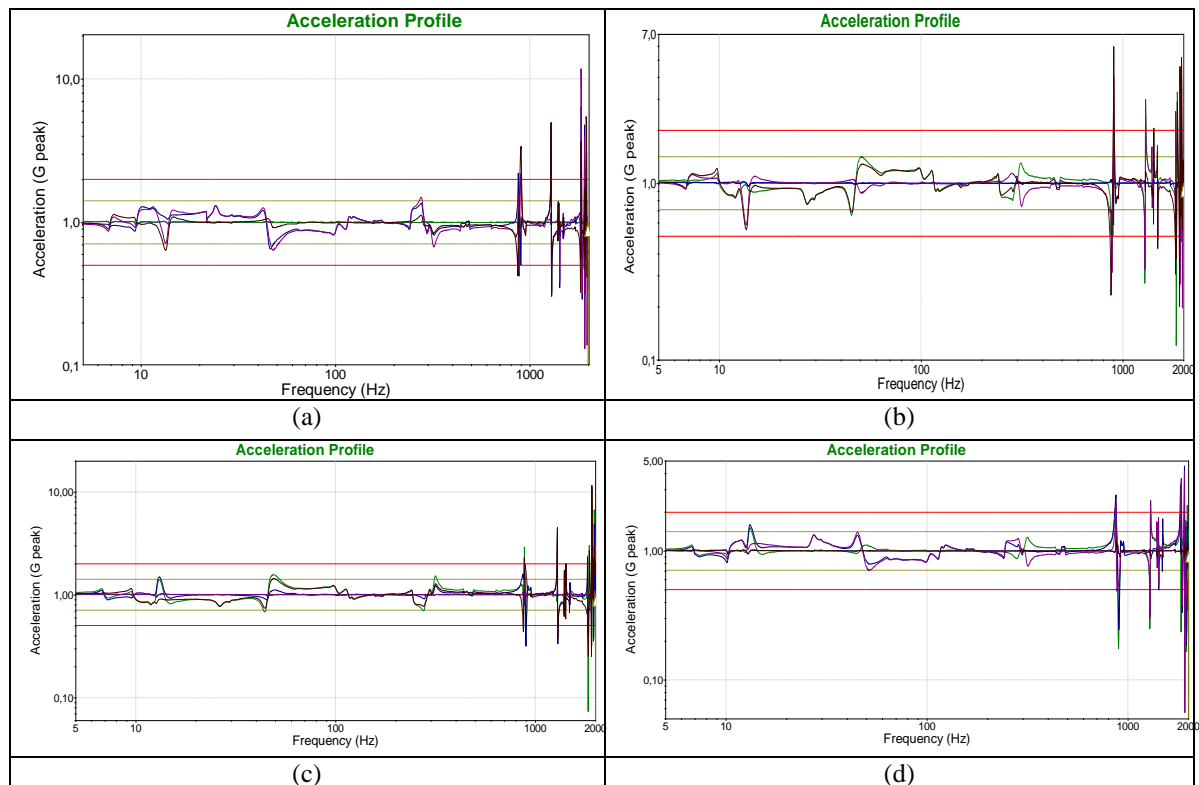


Gambar 5. Skema pengujian HE di Laboratorium Suhu dan Vibrasi Pustekbang-LAPAN

Nilai getaran ditampilkan pada grafik dengan menggunakan domain frekuensi untuk memudahkan pembacaan atau penentuan dari nilai frekuensi alami. Penentuan nilai frekuensi alami salah satunya dengan berdasar pada nilai transmissibility atau perbandingan antara respon frekuensi terhadap frekuensi input. Nilai transmissibility saat terjadinya frekuensi alami adalah lebih dari atau sama dengan dua.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap *head expander* didapatkan data berupa percepatan pada domain frekuensi. Berdasarkan data tersebut dapat diketahui nilai frekuensi alami *head expander*. Grafik hasil pengujian bisa dilihat pada gambar 6 serta nilai frekuensi alami untuk masing-masing channel sebagai kontrol bisa dilihat pada tabel 2.



Gambar 6. Grafik hasil pengujian sine sweep dengan (a) channel 1 sebagai kontrol (b) channel 2 sebagai kontrol (c) channel 3 sebagai kontrol (d) channel 4 sebagai kontrol.

Pada gambar diatas, grafik berwarna hijau merupakan grafik untuk channel 1, warna biru untuk channel 2, warna ungu untuk channel 3 dan warna hitam untuk channel 4. Grafik menunjukkan bahwa pada frekuensi tertentu terdapat puncak-puncak grafik yang lebih tinggi dari sebelum atau sesudahnya. Puncak tersebut dapat dikatakan nilai frekuensi alami dengan syarat nilai transmissibility melebihi 2. Dengan melakukan variasi posisi kontrol didapat nilai frekuensi alaminya menunjukkan bahwa perbedaannya tidak terlalu jauh dan seragam. Kondisi ini menunjukkan bahwa antar ujung sisi luar *Head expander* memiliki nilai homogenitas yang baik.

Pada grafik terlihat bahwa besar amplitudo untuk masing-masing frekuensi natural memiliki nilai yang berbeda. Dengan membuat variasi lokasi penempatan sensor sebagai kontrol didapatkan bahwa frekuensi alami terjadi pada 900 Hz, 1300 Hz dan 1900 Hz. Pada saat sensor 1 dijadikan kontrol, puncak grafik tertinggi didapatkan pada frekuensi 1839 dengan amplitudo sebesar 11,76 g. Puncak grafik tersebut yang merupakan respon dari sensor 3. Pada saat sensor 2 dijadikan kontrol, puncak grafik tertinggi didapatkan pada frekuensi 1958 dengan amplitudo sebesar 5,158 g. Puncak grafik tersebut yang merupakan respon dari sensor 4. Pada saat sensor 3 dijadikan kontrol, puncak grafik tertinggi didapatkan pada frekuensi 1924 dengan amplitudo sebesar 11,57 g. Puncak grafik tersebut yang merupakan respon dari sensor 4. Pada saat sensor 4 dijadikan kontrol, puncak grafik tertinggi didapatkan pada frekuensi 1912 dengan amplitudo sebesar 4,55 g. Puncak grafik tersebut yang merupakan respon dari sensor 3.

Tabel 2. Data percepatan domain frekuensi *Head expander*

No	Channel Kontrol	Channel Respon	Frekuensi alami 1		Frekuensi alami 2		Frekuensi alami 3		Frekuensi alami 4	
			F (Hz)	A (g)	F (Hz)	A (g)	F (Hz)	A (g)	F (Hz)	A (g)
1	Ch 1	Ch 2	874.5	2.203	1,291	4.952	1,839	6.363	1,918	4.782
		Ch 3	901.1	2.192	1,839	11.760	1,918	3.945	1,964	3.097
		Ch 4	901.1	3.38	1,291	4.95	1,839	3.667	1,953	5.463
2	Ch 2	Ch 1	903.8	1.777	1,299	2.91	1,861	3.288	1,924	4.384
		Ch 3	903.8	4.015	1,299	2.983	1,834	2.545	1,958	2.635
		Ch 4	901.1	4.102	1,861	2.843	1,924	4.591	1,958	5.158
3	Ch 3	Ch 1	882.4	2.905	1,828	2.375	1,867	3.027	1,924	10.97
		Ch 2	882.4	2.281	1,291	4.457	1,828	2.309	1,924	3.076
		Ch 4	882.4	2.253	1,867	2.681	1,924	11.57	1,976	2.924
4	Ch 4	Ch 1	1,299	2.405	1,828	3.287	1,912	2.249		
		Ch 2	871.9	2.714	1,828	3.149	1,912	4.55		
		Ch 3	871.9	2.305	1,299	2.453	1,845	3.641	1,912	4.117

Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa hasil eksperimental dengan klaim pabrikan memiliki nilai yang mendekati. Transmisibility pada head expander memiliki nilai yang baik, ini menandakan bahwa *head expander* memiliki homogenitas yang baik meskipun lebih rendah 100 Hz dibandingkan klaim pabrikan dengan posisi sensor sebagai kontrol yang disarankan adalah pada posisi 2 dan 4. Untuk penelitian selanjutnya perlu dilakukan modifikasi lebih lanjut agar head expander memiliki nilai frekuensi alami yang lebih tinggi dengan nilai amplitudo yang lebih kecil. Menambah kekakuan dan mengurangi massa dari head expander mampu menaikkan frekuensi naturalnya. Namun, mengurangi amplitudo secara paksa akan mengurangi respon pada resonansi dan akan berdampak pada nilai transmisibility[11].

4. KESIMPULAN

Pada pengujian *head expander* dengan diuji getar menggunakan sine sweep didapatkan frekuensi alaminya terjadi di sekitar frekuensi 900 Hz, 1300 Hz dan 1900 Hz. Dengan dilakukan variasi sebanyak 4 lokasi untuk sensor kontrol menghasilkan nilai frekuensi alami yang hampir sama sehingga *head expander* tersebut memiliki sifat yang homogen. Pada frekuensi disekitar 1900 Hz terjadi puncak getaran dengan amplitude yang sangat tinggi mencapai 11,76 g, sehingga dapat disimpulkan *head expander* ini dapat digunakan untuk pengujian getaran dengan rentang frekuensi dibawah 1900 Hz.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. De Barros and C. D. A. Souto, "Evaluation of a vibration test fixture," *Int. J. Acoust. Vib.*, 2017.
- [2] H. S. Jeong and J. R. Cho, "Optimal design of head expander for a lightweight and high frequency vibration shaker," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 2016.
- [3] S. Fábry and M. Češkovič, "Aircraft gas turbine engine vibration diagnostics," *MAD - Mag. Aviat. Dev.*, vol. 5, pp. 24–28, 2017.
- [4] S. Kumar, N. Kumar, and R. Kumar, "Vibration Mapping of Head Expander for 9000 Kgf Shaker," *J. Emerg. Technol. Innov. Res.*, vol. 6, no. 6, pp. 280–284, 2019.
- [5] A. Y. Zverev, "Noise control mechanisms of inside aircraft," *Acoust. Phys.*, vol. 62, no. No.4, pp. 478–482, 2016.
- [6] H. Luo, C. Yu, T. Wu, and H. Wang, "Structure design and dynamic characteristic analysis of vibration fixture," in *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2018*, 2018.
- [7] W. X. Shen, W. S. Ma, and L. W. Zhang, "Research on the design of fixture for motor vibration test," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
- [8] Bruel&Kjaer, "Vibration Testing," Denmark.
- [9] E. Solution, *Operating and Maintenance Manual (Medium Force Series)*. China, 2019.
- [10] A. Parkinson, R. Armsond, D. Cooknell, J. Dixon, M. Keith, and R. Morgan, "Engineering Mechanics : Solids," in *Technology a second level course*, 1.1., Yorkshire, : H. Charlesworth of Huddersfield, 1990, pp. 24–30.
- [11] J. Dewanto, "Kajian Teoritik Sistem Peredam Getaran Satu Derajat Kebebasan," *J. Tek. Mesin*, vol. 1, no. 2, pp. 156–162, 1999.

