

ANALISIS MODAL DAN HARMONIK SEBUAH RANCANGAN FIXTURE UJI VIBRASI UNIVERSAL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Mikhael Gilang Pribadi Putra Pratama¹, Muksin², Yusuf Giri Wijaya³, Nur mufidatul Ula⁴
Pusat Teknologi Penerbangan, Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa (LAPAN)-BRIN, Jl Raya Rumpin,
Bogor, 16350, Indonesia

E-mail : mikhael.gilang@lapan.go.id¹, muksin.muksin@lapan.go.id², yusuf.giri@lapan.go.id³,
nur.mufidatul@lapan.go.id⁴

Abstrak-- Fixture uji vibrasi harus dapat memegang *device under test* (DUT) selama proses pengujian dan sesuai dengan kondisi aslinya. Umumnya fixture uji vibrasi yang dibuat harus sesuai dengan geometri DUT. Oleh karena fixture uji vibrasi dibuat secara khusus untuk DUT tertentu, maka hal ini membuat proses uji vibrasi menjadi panjang alurnya dan lama pelaksanaannya. Selain itu, hal tersebut juga menyebabkan tingginya biaya untuk pembuatan fixture baru. Salah satu solusi dari masalah ini adalah dengan membuat fixture uji vibrasi yang bersifat universal. Fixture uji vibrasi yang bersifat universal dirancang mampu digunakan untuk hampir semua bentuk DUT. Fixture tersebut akan digunakan pada pengujian kategori S standar DO-160G section vibrasi yang memiliki rentang pengujian 5-500 Hz sehingga harus memiliki frekuensi natural di atas 500 Hz. Dalam studi ini dilakukan analisis sebuah rancangan fixture uji vibrasi yang bersifat universal menggunakan metode elemen hingga. Analisis dilakukan untuk fixture uji vibrasi universal berukuran 600 mm x 600 mm menggunakan metode analisis modal dan harmonik pada rentang frekuensi 5 Hz - 2000 Hz, kemudian dilakukan analisis kemampuan aktual sistem uji vibrasi berdasarkan massa fixture. Dua jenis material yaitu paduan aluminium dan paduan magnesium digunakan dalam studi ini. Hasil studi menunjukkan bahwa performa fixture yang menggunakan material Al 6061 tidak jauh berbeda dengan material Mg. Frekuensi natural yang diperoleh untuk fixture bermaterial Al 6061 adalah 975.94 Hz sedangkan untuk material paduan Mg adalah 996.88 Hz dengan selisih sebesar 2.14%, keduanya memenuhi kebutuhan pengujian vibrasi DO-160G kategori S. Analisis harmonik menghasilkan perbedaan amplitudo respon yang tidak signifikan yaitu di bawah 0.6%. Fixture bermaterial logam paduan Mg lebih ringan daripada material Al 6061 sehingga menghasilkan kemampuan aktual sistem uji vibrasi yang lebih tinggi. Logam paduan Mg dipilih menjadi kandidat utama material fixture uji vibrasi universal yang akan dimanufaktur karena mampu menghasilkan kemampuan aktual sistem uji vibrasi yang lebih tinggi.

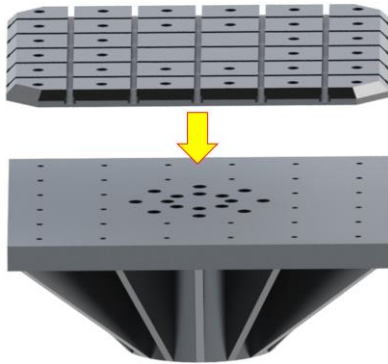
Kata Kunci : *Fixture uji, universal, vibrasi, harmonic, modal, metode elemen hingga*

I. PENDAHULUAN

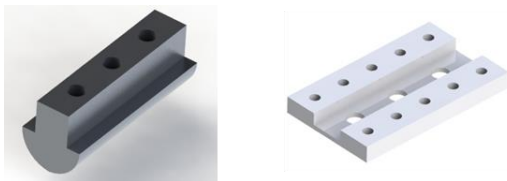
Sebuah komponen elektronika yang dipasang pada pesawat terbang harus lolos uji vibrasi. Uji vibrasi harus dilakukan karena vibrasi merupakan salah satu penyebab kerusakan komponen elektronik yang dipasang pada pesawat terbang[1]. Komponen elektronika ini harus tahan terhadap uji vibrasi yang diberikan sesuai dengan standar DO-160G section vibration dengan tes kategori S. Salah satu tantangan terkait pengujian ini adalah keanekaragaman bentuk perangkat yang diuji atau *device under test* (DUT). Secara umum, sebuah fixture konvensional uji vibrasi didesain untuk mengakomodasi bentuk DUT yang spesifik sehingga tidak dapat digunakan untuk DUT berbentuk lain. Hal ini menyebabkan terjadinya pengulangan proses pembuatan fixture setiap akan dilaksanakan pengujian DUT dengan bentuk yang berbeda. Proses pembuatan fixture memakan waktu dan biaya yang tidak sedikit sehingga menjadi

rintangan dalam pengujian vibrasi. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu fixture uji vibrasi universal yang mampu mengakomodasi sebagian besar bentuk DUT untuk menekan biaya dan waktu yang dibutuhkan dalam suatu pengujian vibrasi.

Pada pengujian vibrasi DUT dipasang pada sebuah test fixture. Sebuah test fixture harus memiliki sifat kaku, memiliki redaman yang rendah, dan memiliki massa yang seringan mungkin[2]. Fixture uji vibrasi universal akan dipasang di atas *head expander* (gambar 1) atau *slip table*. Selanjutnya DUT akan dipasang pada *primary* tab atau adapter tab yang dibuat sesuai dengan kebutuhan pemasangan DUT. Ilustrasi *primary* tab dan adapter tab dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 1. Pemasangan fixture universal (atas) ke *Head Expander* (bawah)



Gambar 2. *Primary* tab (kiri) dan adapter tab (kanan)

Pada laboratorium vibrasi Pustekbang memiliki *head expander* dengan model HE600SQA-240 dengan luasan atas sebesar 600 x 600 mm yang terbuat dari material aluminium serta memiliki range frekuensi pengujian 5-2000 Hz[3]. *Design* fixture uji vibrasi universal harus memiliki frekuensi natural di atas atau di bawah rentang frekuensi pengujian yang dilakukan[4]. Pada uji vibrasi sesuai tes kategori S standar DO-160G rentang frekuensi saat pengujian adalah 5-500 Hz[5]. Proses desain fixture uji vibrasi universal ini menggunakan metode elemen hingga dan perangkat lunak solidworks. Jenis material fixture yang digunakan dalam penelitian ini adalah logam paduan Al 6061 dan logam paduan magnesium. Kedua jenis material tersebut secara umum digunakan sebagai bahan baku pembuatan fixture uji vibrasi karena memiliki rasio kekakuan terhadap massa yang baik sehingga dapat mencapai frekuensi natural yang tinggi, selain itu, kedua material tersebut memiliki sifat *machinability* yang baik.

Tujuan dari penelitian ini adalah membuat desain fixture uji vibrasi universal yang memiliki frekuensi natural lebih dari 500 Hz sehingga tidak terjadi resonansi ketika pengujian kategori S standar DO-160G yang sering dilakukan di lab uji vibrasi Pustekbang untuk komponen pesawat terbang serta dapat dicapai menggunakan jenis material yang sudah dipilih. Selain itu, desain harus dapat digunakan untuk berbagai bentuk DUT sehingga dapat mengurangi

waktu dan biaya pembuatan fixture tiap DUT yang akan diuji vibrasi.

II. METODOLOGI PENELITIAN

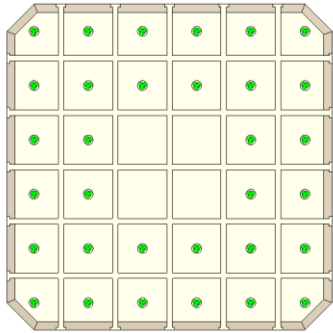
2.1 Metode Elemen Hingga, Analisis Modal, dan Harmonik

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Metode Elemen Hingga (MEH), yaitu sebuah metode yang membagi objek analisis menjadi elemen-elemen diskrit dengan jumlah tertentu yang kemudian diselesaikan secara numerik. Pada aplikasi MEH dalam vibrasi terdapat beberapa metode analisis yang digunakan untuk memperkirakan karakteristik vibrasi dari suatu benda uji, diantaranya adalah metode analisis modal dan harmonik. Analisis modal mampu memperkirakan karakteristik natural benda uji, diantaranya adalah frekuensi natural, redaman, dan bentuk mode getar [6][7][8]. Namun, metode ini merupakan tipe vibrasi bebas tanpa arah eksitasi tertentu. Metode analisis harmonik menuntut kelemahan tersebut. Analisis harmonik adalah sebuah teknik yang digunakan untuk menentukan respon dinamik linier pada kondisi setimbang dengan beban yang berubah secara harmonik [9]. Eksitasi analisis harmonik merupakan sebuah fungsi sinus dengan amplitudo konstan [10].

Analisis modal dilakukan untuk memperoleh data frekuensi natural berserta deformasi yang terjadi pada frekuensi tersebut atau biasa disebut dengan mode getar. Semakin tinggi penomoran mode getar, maka frekuensi natural terjadinya deformasi pada mode tersebut akan semakin tinggi. Selanjutnya dilakukan analisis harmonik dengan rentang pengujian 5-2000 Hz dengan akselerasi 1 G sesuai spesifikasi *head expander* untuk mengetahui respon harmonik yang terjadi pada rentang frekuensi tersebut.

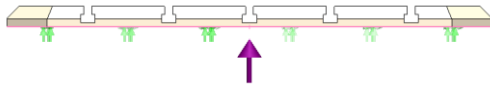
Pada pemodelan baik untuk analisis modal maupun analisis harmonik diberikan kondisi batas berupa *fixed-hinge* yaitu jenis kondisi batas yang memungkinkan pergerakan rotasi pada sumbu namun tidak dimungkinkan adanya translasi pada setiap lubang baut pada fixture untuk memodelkan pemasangan fixture ke *head expander* seperti yang diilustrasikan pada gambar 1, penggunaan kondisi batas *fixed-hinge* dapat dilihat pada gambar 3. Pembebanan dan konstrain selain kondisi batas

pemasangan dan massa fixture tidak diberikan pada analisis modal karena merupakan tipe vibrasi bebas.



Gambar 3. Penggunaan kondisi batas *fixed-hinge*

Gaya eksitasi yang digunakan dalam analisis harmonik ini adalah *base excitation* yang menggambarkan eksitasi dari *shaker*. Arah eksitasi yang ditinjau adalah arah vertikal seperti yang diilustrasikan pada gambar 4. Analisis harmonik arah horizontal tidak dilakukan karena memiliki kekakuan yang sangat tinggi berdasarkan geometri fixture dan kondisi batasnya sehingga berada di luar rentang frekuensi yang dianalisis.



Gambar 4. Ilustrasi arah eksitasi analisis harmonik

2.2 Properti Mekanik Material

Dalam penelitian ini, dilakukan evaluasi pada dua jenis material sebagai bahan baku fixture uji vibrasi universal. Kedua material tersebut adalah logam paduan Al 6061 dan logam paduan magnesium. Material tersebut sering digunakan dalam pembuatan fixture uji vibrasi karena memiliki rasio kekakuan terhadap massa yang baik sehingga frekuensi natural fixture tersebut mencapai angka yang tinggi.

Data properti mekanik material Al 6061 terdapat pada tabel 1, sedangkan tabel 2 berisi data properti mekanik material logam paduan magnesium.

Tabel 1. Properti material Al 6061

Properti material	Nilai
Modulus Elastisitas	69 GPa
Poisson Ratio	0.33

Properti material	Nilai
Densitas	2.7 g/cm ³
Yield Strength	270 MPa
Rasio Redaman [11]	0.00695

Tabel 2. Properti material logam paduan Mg

Properti material	Nilai
Modulus Elastisitas	45 GPa
Poisson Ratio	0.35
Densitas	1.7 g/cm ³
Yield Strength	160 MPa
Rasio Redaman [11]	0.01081

2.3 Perhitungan Kemampuan Aktual Sistem Uji Vibrasi

Sistem uji vibrasi yang bergerak, terdiri atas *shaker armature*, *head expander* atau *slip table*, fixture uji, dan DUT. Kemampuan uji sistem bergantung kepada spesifikasi *shaker* yang digunakan, kemampuan tersebut dinyatakan dalam satuan Kgf atau *Kilogram Force*, yaitu satuan gaya pada percepatan gravitasi standar. Kemampuan aktual sistem vibrasi merupakan kemampuan *shaker* dikurangi berat komponen sistem yang bergerak. Venkat, dkk. (2016) mengekspresikan sebuah persamaan untuk menghitung massa fixture yang diperbolehkan [12] yaitu persamaan (1).

$$\frac{W_s}{M_a + M_e + M_u + M_f} \geq GRMS \quad (1)$$

Dengan W_s adalah kemampuan *shaker*, M_a adalah massa *armature*, M_e adalah massa *expander*, M_u adalah massa DUT, M_f adalah massa fixture, dan GRMS adalah akselerasi yang hendak digunakan dalam pengujian. Persamaan tersebut kemudian dimodifikasi menjadi bentuk yang sesuai untuk kasus dalam studi ini, yaitu persamaan (2).

$$W_s - (M_1 + M_2 + M_3)G \geq W \quad (2)$$

Dengan W_s adalah kemampuan *shaker*, M_1 adalah massa *armature*, M_2 adalah massa *head expander* untuk pengujian vertikal atau *slip table* untuk pengujian horizontal, M_3 adalah massa fixture, W adalah kemampuan aktual sistem uji vibrasi, dan G adalah akselerasi yang hendak digunakan dalam

pengujian. Data input perhitungan yang diperoleh dari *data sheet* sistem *shaker* dan perhitungan pendekatan massa desain fixture menggunakan masing-masing material terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data input perhitungan kemampuan aktual sistem uji vibrasi

Parameter	Nilai
Kemampuan shaker (Ws) [13]	1000 N
Massa Armature (M1) [13]	10 Kg
Massa Slip Table (M2) [13]	35 Kg
Massa Head Expander (M2) [13]	45 Kg
Massa Fixture Universal (Al) (M3)	18.7 Kg
Massa Fixture Universal (Mg) (M4)	11.8 Kg

Kemampuan aktual sistem uji vibrasi menentukan berat maksimum DUT yang dapat diuji dan akselerasi maksimum yang dapat digunakan dalam suatu pengujian ketika mempergunakan fixture universal yang ada dalam penelitian ini. Berat maksimum DUT dan akselerasi maksimum berbanding terbalik, semakin besar nilai berat DUT, maka semakin rendah akselerasi maksimum yang dapat digunakan dalam pengujiannya. Variabel yang menentukan kemampuan aktual sistem uji vibrasi dalam penelitian ini adalah massa fixture universal.

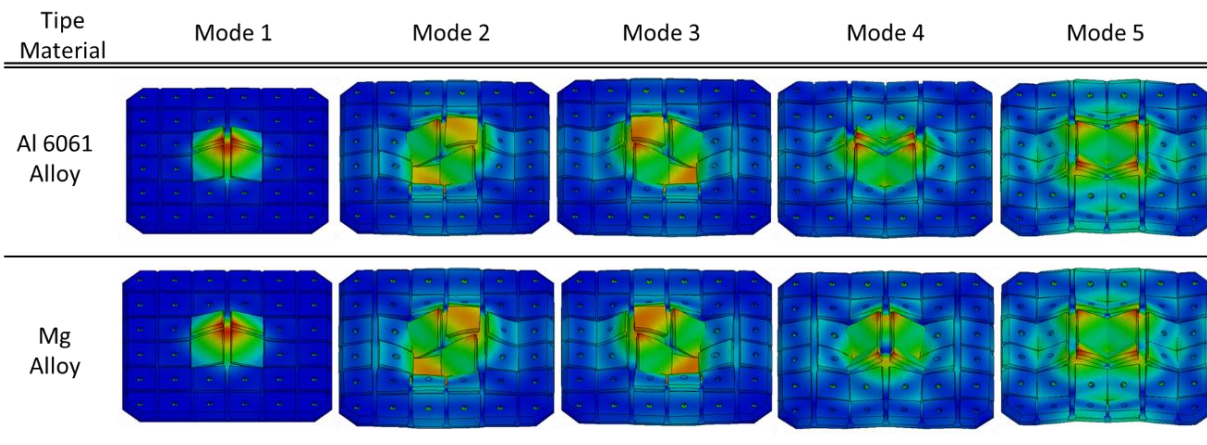
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Modal

Pada tabel 4 terdapat deformasi yang terjadi pada masing-masing mode. Terlihat bahwa deformasi terpusat pada bagian tengah fixture, yaitu lokasi yang tidak tersambung dengan *head expander* menggunakan baut. Tidak adanya sambungan baut ke *head expander* menyebabkan lokasi tersebut memiliki kekakuan struktur yang lebih rendah daripada lokasi lainnya, sehingga deformasi terpusat pada bagian tengah fixture.

Perbedaan bentuk deformasi terjadi pada mode 4, dengan deformasi fixture Al 6061 masuk ke bidang sedangkan deformasi fixture logam paduan Mg keluar bidang, namun perbedaan lokasi terjadinya deformasi tidak signifikan sehingga dapat diketahui bahwa rasio antara kekakuan terhadap massa untuk kedua jenis material tersebut tidak jauh berbeda. Frekuensi setiap mode disajikan dalam tabel 5.

Tabel 4. Mode Deformasi



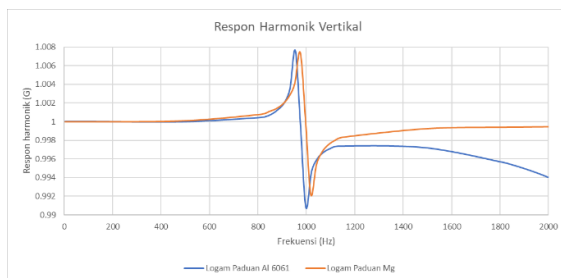
Tabel 5. Frekuensi natural pada mode 1 sampai dengan mode 5

Mode bentuk	Frekuensi (paduan Al 6061) (Hz)	Frekuensi (paduan Mg) (Hz)	Selisih (%)
Mode 1	975.94	996.88	2.14
Mode 2	2324.20	2373.70	2.13
Mode 3	2337.40	2386.90	2.12
Mode 4	2630.70	2685.20	2.07
Mode 5	2852.30	2910.50	2.04

Material paduan Mg memiliki frekuensi natural yang lebih tinggi daripada Al 6061, namun perbedaan frekuensi natural tersebut tidak signifikan, dengan nilai selisih terbesar 2.14%. Selisih yang kecil menunjukkan rasio antara kekakuan struktur dengan massa fixture yang tidak jauh berbeda antara material Al 6061 dengan logam paduan Mg.

3.2 Analisis Harmonik

Gambar 5 merupakan grafik respon harmonik fixture universal. Terlihat respon yang terjadi saat frekuensi resonansi bernilai kecil dengan nilai gain di bawah 8 %, semakin kecil nilai gain, maka semakin kecil peluang terjadinya kerusakan akibat fenomena resonansi. Terlihat bahwa resonansi pada fixture bermaterial logam paduan Mg terjadi pada frekuensi yang lebih tinggi dan memiliki nilai respon yang lebih rendah. Selisih antara nilai respon Al 6061 dengan logam paduan Mg adalah kurang dari 0.6 %.

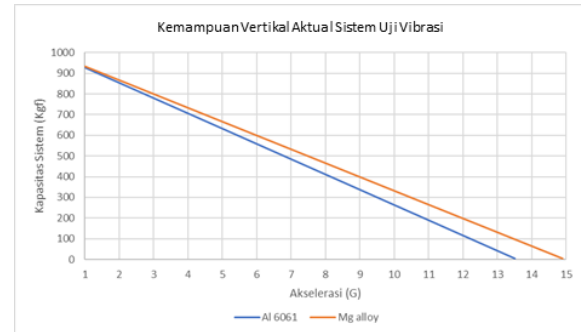


Gambar 5. Respon harmonik fixture

3.3 Kemampuan Aktual Sistem Uji Vibrasi

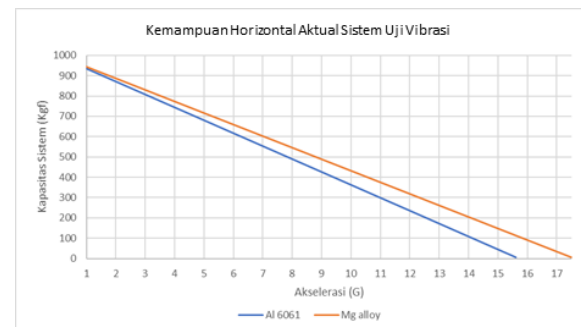
Hasil perhitungan kemampuan aktual sistem vibrasi untuk arah pengujian vertikal disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 6. Grafik tersebut merupakan *envelope* kondisi pengujian yang terdiri dari massa DUT dan akselerasi maksimum yang mampu dikeluarkan oleh sistem uji vibrasi ketika pengujian DUT tersebut. Kemampuan aktual sistem vibrasi dengan fixture bermaterial logam paduan Mg lebih tinggi daripada ketika menggunakan fixture bermaterial Al 6061. Perbedaan tersebut semakin kontras seiring dengan bertambahnya akselerasi pengujian. Sistem dengan fixture bermaterial Mg memiliki kemampuan untuk mencapai akselerasi

pengujian 15 G sedangkan Al 6061 hanya dapat mencapai 13.5 G.



Gambar 6. Kemampuan vertikal aktual sistem vibrasi

Hasil perhitungan kemampuan aktual sistem vibrasi untuk arah pengujian horizontal disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 7. Serupa dengan kasus vertikal, kemampuan aktual sistem uji vibrasi dengan fixture bermaterial logam paduan Mg lebih tinggi daripada ketika menggunakan fixture bermaterial Al 6061. Sistem dengan fixture bermaterial Mg memiliki kemampuan untuk mencapai akselerasi pengujian 17.5 G sedangkan Al 6061 hanya dapat mencapai 15.6 G.



Gambar 7. Kemampuan horizontal aktual sistem vibrasi

Berdasarkan kedua data tersebut, keuntungan fixture yang menggunakan material logam paduan magnesium dengan massa yang jauh lebih ringan terletak pada kemampuan aktual sistem uji vibrasi sehingga akselerasi maksimum pengujian yang lebih tinggi dapat digunakan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, karakteristik vibrasi antara fixture universal bermaterial AL 6061 dengan logam paduan magnesium tidak jauh berbeda. Perbedaan terbesar terjadi pada frekuensi natural pertama hasil analisis modal yaitu sebesar 2.14%, dengan nilai frekuensi

natural fixture bermaterial logam paduan magnesium yang lebih tinggi yaitu 996.88 Hz sedangkan Al 6061 memiliki frekuensi natural 975.94 Hz. Kedua frekuensi natural tersebut memenuhi kebutuhan pengujian kategori S standar DO160-G section vibrasi karena lebih dari 500 Hz. Hasil analisis harmonik menunjukkan respon fixture terhadap eksitasi yang diberikan. Amplitudo respon yang terjadi ketika resonansi memiliki nilai gain yang tidak signifikan yaitu dibawah 8 %. Selisih antara nilai amplitudo respon kedua jenis material memiliki nilai yang tidak signifikan yaitu dibawah 0.6 %. Massa fixture bermaterial logam paduan magnesium memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan fixture bermaterial Al 6061 sehingga kemampuan aktual sistem uji vibrasi bernilai lebih tinggi. Berdasarkan data-data tersebut, maka logam paduan magnesium menjadi kandidat material utama fixture uji universal yang akan dimanufaktur.

V. ACKNOWLEDGEMENT

Riset ini didukung dan dibiayai oleh Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa BRIN dalam konteks pengembangan laboratorium uji vibrasi. Riset ini dalam pengawasan Program Pengembangan Fasilitas - Pusat Teknologi Penerbangan.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fábry, S., & Češkovič, M. (2017). Aircraft gas turbine engine vibration diagnostics. *MAD - Magazine of Aviation Development*, 5, 24–28. <https://doi.org/10.14311/mad.2017.04.04>
- [2] E, S., Gidaveer, R. S., N, S., Patil, S. K., K, A. K., & J, E. (2020). Design and Analysis of Vibration Test Fixture for 6.2 kW Siemens[R] Motor. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, 9(5), 3539–3546.
- [3] Ula, N. M., Wijaya, Y. G., Muksin, M., Pratama, M. G. P. P., & Syah, A. H. N. (2020). Dynamical Characteristics Of A Head Expander For Vibration Testing In Pustekbang Laboratory. *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, 12(2), 167–174. <https://doi.org/10.28989/ANGKASA.V12I2.773>
- [4] Rahman, A. H., Sivakumar, P., V, B., & Jagath, R. K. (2016). *Design of a Composite Vibration Fixture for Testing Fuel Tank for Combat Vehicle Application. International NAFEMS Conference on Engineering Analysis, Modeling, Simulation and 3D-Printing (NAFEMS-3D)*, August.
- [5] (RTCA), R. T. C. for A. (2010). *DO-160, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*.
- [6] He, Jimin, and Zhi-Fang Fu. (2001). *Modal Analysis*, pp 1-11. Elsevier.
- [7] Siva, I., M., Dkk. (2021). *Tribological Studies and Modal Analysis on Biocomposite/PVC Core Sandwich Panels. Tribology of Polymer Composites. Elsevier*, 301–19. doi: 10.1016/B978-0-12-819767-7.00015-3.
- [8] Wan, Yu. (2021). *The Modal and Harmonic Response Analysis of Final Superheater Based on Workbench. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 675(1). doi: 10.1088/1755-1315/675/1/012177.
- [9] Perumal, Shanmugam, Raghunathan Swaminathan, dan Mike Christensen. (2020). *Forced Vibration Harmonic Response Analysis of Semi-Mobile Crusher Station. Springer Advances in Engineering Design and Simulation*, 157–69. doi: 10.1007/978-981-13-8468-4_14.
- [10] Tang, Yadong, Yongchang Yu, Jingzhao Shi, dan Shuaijun Zhang. (2017). *Modal and Harmonic Response Analysis of Key Components of Robotic Arm Based on ANSYS. Pp. 109–14 in Vibroengineering Procedia. Vol. 12. JVE International*.
- [11] Jiang, Xin, dkk. (2019). *Optimization of Magnesium Alloy Wheel Dynamic Impact Performance. Hindawi Advance in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2019/2632031>
- [12] Venkat, Dkk. (2016). *Design, Analysis and Testing of Multi-axis Vibration Fixture for Electronic Devices. Indian Journal of Science and Technology*, 9(34). DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i34/100895
- [13] ETS Solution. (2019). *Medium Force Series I Operating & Maintenance Manual. Issue No.: 070216C-2*.