



## Analisis Karakteristik Akustik Dan Dinamik *Micro-Perforated Panel* Dengan Struktur *Honeycomb* Menggunakan Metode Elemen Hingga

Debby Perkasa<sup>1</sup>, Afdhilla<sup>2</sup>, Meifal Rusli<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas Padang

<sup>1</sup>debbyperkasa09@gmail.com <sup>2</sup>afdhillla68@gmail.com <sup>3</sup>meifal@eng.unand.ac.id

### Abstract

This study focuses on the discussion of the correlation of acoustic and dynamic characteristics of hybrid panels, namely Micro-perforated Panel (MPP) and Honeycomb (HC) structures. Acoustic characteristics in experimental studies are obtained by the sound absorption coefficient and Sound Transmission Loss. Meanwhile, the dynamic characteristics are obtained by the mode and frequency response analysis of numerical simulation methods. The results of these two characteristics serve as a benchmark for the development of experimental data studies/analysis. The purpose of this study is to obtain dynamic characteristics using mode and frequency response analysis through the finite element method. The development of this experimental study/analysis data is to overcome the drawbacks of experimental testing. The weakness obtained from experimental studies is that the stages are complicated and require a very large amount of money. The method in this study was carried out by numerical simulation using the finite element method using the Ansys 2019 R3 program. The results of this study obtained dynamic characteristics from the development of experimental study analysis methods using numerical simulations through the finite element method. Numerical simulation on the hybrid panel provides efficiency at the experimental testing stage. The results of the mode and frequency response analysis obtained by numerical simulation methods have similarities in the frequency range of high and low frequency values of sound absorption coefficient and sound transmission loss.

Keywords: Acoustic Characteristics, Dynamic Characteristics, Micro-Perforated Panel, Honeycomb, FEM.

### Abstrak

Penelitian ini berfokus pada bahasan korelasi karakteristik akustik dan dinamik dari panel hybrid yaitu *Micro-perforated Panel* (MPP) dan struktur *Honeycomb* (HC). Karakteristik akustik pada kajian eksperimental diperoleh dengan koefisien penyerapan suara dan *Sound Transmission Loss*. Sedangkan, karakteristik dinamik diperoleh dengan mode dan frekuensi respon analisis metode simulasi numerik. Hasil dari kedua karakteristik tersebut sebagai tolak ukur dari pengembangan kajian / analisis data eksperimental. Tujuan penelitian ini adalah memperoleh karakteristik dinamik menggunakan mode dan frekuensi respon analisis melalui metode elemen hingga. Pengembangan data kajian/ analisis eksperimental ini untuk mengatasi kelemahan dari pengujian eksperimental. Kelemahan yang didapatkan dari kajian eksperimental adalah tahapan yang rumit dan membutuhkan biaya yang sangat besar. Metode pada penelitian ini dilakukan dengan cara simulasi numerik melalui metode elemen hingga dengan menggunakan program Ansys 2019 R3. Hasil penelitian ini didapatkan karakteristik dinamik dari pengembangan metode analisis kajian eksperimental dengan menggunakan simulasi numerik melalui metode elemen hingga. Simulasi numerik pada panel hybrid memberikan *efisiensi* pada tahapan pengujian eksperimental. Hasil mode dan frekuensi respon analisis yang diperoleh dengan metode simulasi numerik memiliki persamaan pada rentan frekuensi nilai tinggi dan rendahnya nilai frekuensi koefisien penyerapan suara dan sound transmission loss.

Kata kunci: Karakteristik Akustik, Karakteristik Dinamik, *Micro-Perforated Panel*, *Honeycomb*, Metode Elemen Hingga.

### 1. Pendahuluan

Kebisingan (*noise*) adalah suara berlebihan atau suara yang tidak diinginkan dan berpotensi menimbulkan gangguan pendengaran, fisik, dan psikologis terhadap pekerja di industri [1]. Kebisingan menjadi salah satu masalah industri akan tetapi sering diabaikan. Tingkat

kebisingan yang tinggi diantaranya terjadi pada industri yang mengoperasikan mesin pres, mesin pemotong baja, kompresor, dan mesin yang beroperasi menggunakan motor diesel [2].

Kondisi ini menjadi perhatian pemerintah, sehingga mengeluarkan PERMENAKER No.13 / MEN / X /

tahun 2011 tentang Nilai Ambang Batas (NAB) kebisingan di tempat kerja. Pada permenaker tersebut ditetapkan NAB kebisingan sebesar 85 dBA sebagai intensitas tertinggi dan merupakan nilai yang masih dapat diterima oleh pekerja tanpa mengakibatkan penyakit atau gangguan kesehatan dalam pekerjaan sehari-hari untuk waktu tidak melebihi 8 jam sehari atau 40 jam seminggu. [3]

Salah satu upaya mengatasi dampak kebisingan di tempat kerja adalah dengan menggunakan peredaman suara. Sistem peredam suara yang terdiri dari panel berlubang dengan bahan serap dan rongga udara yang didukung oleh *rigid plunger* telah banyak dipakai dalam memenuhi kebutuhan untuk pengendalian kebisingan [4]. Peredam ini terdiri dari permukaan datar berpori didukung oleh rongga udara untuk membentuk resonator akustik. Perangkat ini disebut sebagai peredam *micro-perforated panel* (MPP) yang dapat menghasilkan penyerap suara direntang frekuensi tertentu [5].

Penelitian yang dilakukan oleh Xie, 2020 [6], menggambarkan penyerapan suara yang dibentuk dengan pola struktur sarang lebah (HC) yang berdasarkan dua model teoritis yaitu *microperforated panel* (MPP) dan *helmholtz resonator* (HR). Panel penyerapan dengan pola struktur HC secara eksperimental diketahui memiliki karakteristik yang sangat baik terhadap pembebanan yang tinggi, energi penyerapan impak kapasitas tinggi, dan daya serap suara yang unik [7].

Sebagai lembaga perguruan tinggi Universitas Andalas mengambil peran dalam mengatasi masalah kebisingan dengan melakukan kajian eksperimental mengatasi kebisingan melalui penelitian yang dilakukan di Laboratorium Dinamika Struktur dengan menggunakan struktur *hybrid* agar panel penyerap suara dapat menahan frekuensi rendah.

Pada panel gabungan (*hybrid*) *micro perforated panel* (MPP) dengan struktur sarang lebah dari bahan bersifat fleksibel menggunakan TPU (*thermoplastic polyurethane*) dan *Polylactic Acid* (PLA) telah dikaji. Kajian eksperimental dilakukan untuk mendapatkan karakteristik sifat akustik dari struktur panel *hybrid* tersebut.

Dari sifat akustik tersebut didapatkan koefisien penyerapan suara (*Sound absorption coefficient*) dan *Sound Transmission Loss* (STL). Koefisien penyerapan suara tersebut diperoleh dengan menggunakan tabung impedansi empat mikrofon. Pengujian dilakukan sesuai dengan prosedur standar ASTM E-1050. Pengujian dilakukan dalam rentang frekuensi 300 - 3800 Hz. Hal ini dibatasi oleh kemampuan tabung impedansi yang hanya mampu menangkap frekuensi minimum 272,151 Hz dan maksimum 3876,615 Hz.

Agar frekuensi suara yang melalui tabung impedansi bisa diatur maka selanjutnya digunakan program

aplikasi *Mathlab*. Selain itu, *Mathlab* digunakan untuk mengolah nilai *Frequency Response Function* (FRF) dari *LabView* untuk menghasilkan nilai koefisien penyerapan suara dari spesimen uji panel *hybrid*.

Sebagai langkah pengembangan dari kaji eksperimental, selanjutnya dilakukan analisis numerik dengan metode elemen hingga. Ini digunakan untuk memecahkan masalah pemodelan matematika keteknikan, khususnya terkait dengan analisis struktur dalam berbagai bentuk dan kondisi, termasuk didalamnya struktur *hybrid* [8]. Dalam hal ini *sensitifitas mesh* pada elemen hingga dapat meningkatkan akurasi penghitungan secara signifikan.

Pada penelitian ini simulasi numerik digunakan sebagai korelasi karakteristik akustik dan dinamik pada panel *hybrid* MPP dan HC [9]. Variasi yang digunakan sangat berpengaruh didalam nilai FRF panel *hybrid*, yang mana FRF menghasilkan nilai koefisien penyerapan suara dari spesimen uji. Perilaku elastis dan kekuatan struktur panel *hybrid* sangat dipengaruhi oleh *mechanical properties* material [10]. Material fleksibel (TPU) dan material kaku (PLA) dan juga variasi dimensi antara jarak lubang MPP serta ketebalan dinding struktur HC digunakan sebagai parameter simulasi numerik dengan menggunakan metode elemen hingga.

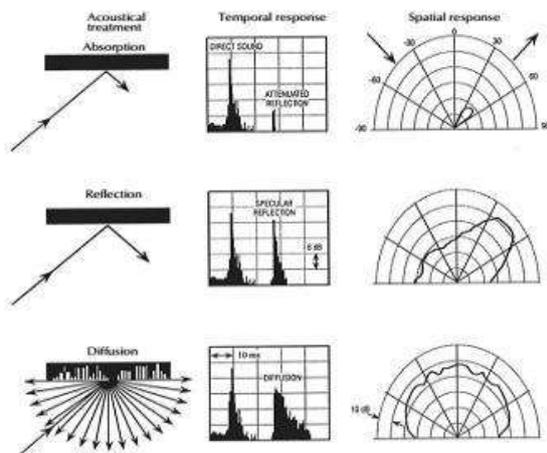
Akustik merupakan ilmu tentang gelombang bertekanan kecil di udara yang dapat dideteksi oleh manusia seperti suara. Ruang lingkup akustik telah diperluas ke frekuensi yang lebih tinggi dan lebih rendah seperti USG dan infrasonik. Sekarang getaran struktural termasuk dalam akustik, dan persepsi suara merupakan bidang penelitian akustik. Oleh karena itu, akustik adalah bagian dari dinamika fluida [11].

Suara merupakan perubahan tekanan yang terjadi pada perpindahan partikel atau kecepatan partikel melalui media udara. Suara dihasilkan ketika udara diatur ke dalam getaran dengan cara apapun, tetapi suara biasanya dihasilkan oleh beberapa objek bergetar yang bersentuhan dengan udara [12]. Suara dengan mudah dialirkan pada media gas, cairan, dan padat seperti ; udara, air, baja, dan sebagainya, yang semuanya merupakan media elastis. Oleh karena itu, suara tidak dapat disebarkan tanpa media [13].

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Namun, energi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Jika ada energi suara yang berlebihan di suatu ruangan, energi itu sendiri tidak dapat dihilangkan tetapi dapat diubah menjadi bentuk yang tidak berbahaya.

Sejauh ilustrasi gelombang menunjukkan udara di depan piston dikompres ketika didorong ke depan, dan udara disekitarnya mengembang untuk mengisi ruang ketika piston balik. Dengan demikian terjadi serangkaian kompresi dan ekspansi udara saat piston

yang didorong bolak-balik. Karena elastisitas udara, area kompresi tidak tetap tetapi bergerak kesegala arah. Jika pengukuran tekanan ditetapkan pada titik tetap dan variasi tekanan dicatat akan ditemukan bahwa, tekanan bervariasi dalam interval reguler dan dalam jumlah yang sama di atas dan di bawah tekanan atmosfer rata-rata. Tentu saja, variasi aktual tidak dapat dilihat karena tingginya tingkat dimana itu terjadi. Anggap bahwa tekanan seketika, sepanjang garis ke arah perambatan suara, diukur dan diplot dengan ordinat yang mewakili tekanan, hasilnya akan menjadi garis bergelombang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

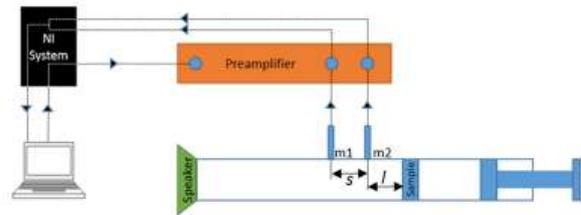


Gambar 1. Ilustrasi bentuk suara dengan perlakuan penyerapan, pemantulan dan penyebaran suara

Peredam suara dengan *micro-perforated panel* (MPP) menjadi solusi yang baik dari pada peredam konvensional berpori dalam membuat kontrol kebisingan. Kinerja akustik penyerap suara MPP tergantung pada empat parameter desain utama, seperti diameter perforasi, kedalaman rongga udara, jarak antara perforasi, dan ketebalan MPP. [14]

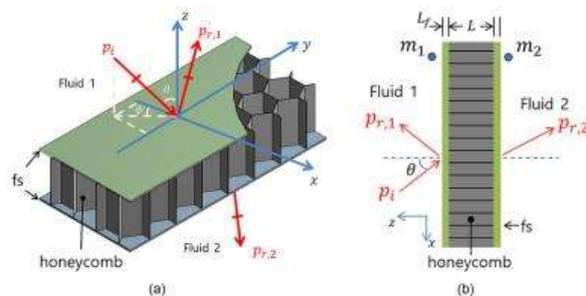
Peredam suara dengan *micro-perforated panel* (MPP) menjadi solusi yang baik dari pada peredam konvensional berpori dalam membuat kontrol kebisingan [14]. Kinerja akustik penyerap suara MPP tergantung pada empat parameter desain utama, seperti diameter perforasi, kedalaman rongga udara, jarak antara perforasi, dan ketebalan MPP.

Studi eksperimental dilakukan untuk memvalidasi model analitis dari beberapa penyerapan MPP. Pengukuran penyerapan koefisien yang normal telah dilakukan dengan menggunakan tabung impedansi dengan dua mikrofon yang biasa digunakan pada sampel yang ditempatkan di salah satu ujung tabung dengan permukaan belakang tabung yang kaku, sedangkan ujung depan tabung memiliki peneras suara untuk menghasilkan sinyal acak *broadband* ke dalam tabung gambar 2 [15].



Gambar 2. Skematik pengujian menggunakan tabung impedansi

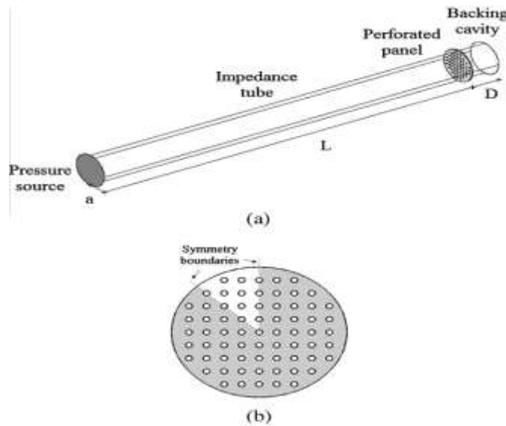
Panel *honeycomb* (struktur penopang sarang lebah) memiliki sifat mekanik yang baik dan banyak digunakan di berbagai industri karena memiliki rasio pada frekuensi suara yang datang terhadap bentuk struktur. Pengamatan isolasi akustik dipelajari dalam kaitannya dengan ketebalan *honeycomb*, ukuran sel, ketebalan dinding sel, dan bentuk sel. Sel yang lebih kecil dan dinding sel yang lebih tebal meningkatkan kinerja isolasi. Konfirmasi pengamatan bahwa kinerja isolasi akustik panel *honeycomb* dapat ditingkatkan dengan mengubah desain sel seperti ditunjukkan pada Gambar 3 [16].



Gambar 3. Geometri panel honeycomb: (a) tampilan tiga dimensi dan (b) tampilan dua dimensi

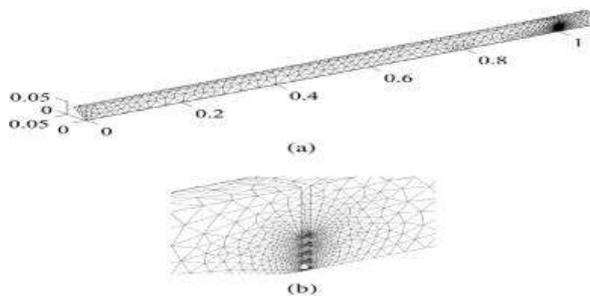
Sebagian besar model analitis yang ditujukan adalah untuk menentukan sifat akustik dari panel berlubang yang kaku. Di dalam cara menentukan impedansi akustik di seluruh panel yaitu dengan menggunakan satu lubang dan kemudian menggunakan panel berpori. Namun, dalam kasus penyebaran lubang yang tidak homogen atau konfigurasi yang lebih kompleks, pendekatan ini tidak lagi valid. Penelitian yang dilakukan oleh *J.Carbajo* [17], mengeksplorasi beberapa keterbatasan dan mengusulkan Metode Elemen Hingga (MEH) yang mengimplementasikan persamaan *Navier Stokes*. Linierisasi dalam domain frekuensi untuk menganalisis kinerja akustik terjadi pada insiden normal dari peredam panel berpori [18].

Prosedur pemodelan yang didasarkan pada konfigurasi sederhana dan mudah dianalisis. Prosedur yang terdiri dari dua volume silinder dipisahkan oleh spesimen uji yang mewakili tabung impedansi dengan rongga pendukung, seperti yang ditunjukkan secara skematis pada Gambar 4.



Gambar 4. Representasi skematis dari pengaturan numerik: (a) impedance tube dan rongga penopang dipisahkan oleh panel berlubang, dengan sumber tekanan di sisi kiri tabung dan (b) tampak depan dengan asumsi batasan simetri

Pembuatan *mesh* dari lapisan batas dalam geometri 3D bukanlah tugas yang mudah, seperti elemen *Tetrahedral Taylor-Hood* telah digunakan dengan memiliki kerapatan elemen yang relatif lebih tinggi pada dinding luar dan di dalam panel berlubang, sehingga dapat menangkap viskos pada efek kondisi batas *thermal*. *Mesh* yang digunakan untuk model elemen hingga *viscothermal* digambarkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Mesh yang digunakan untuk model elemen hingga *viscothermal*: (a) tampilan umum dan (b) tampak detail

Solusi elemen hingga menggunakan perangkat lunak komersial MSC.ACTRAN yang diperoleh dari pengukuran tabung impedansi. Optimalisasi sederhana dilakukan berdasarkan pada model yang dikembangkan untuk mendapatkan konfigurasi penyerap yang efisien [19]. Model *Finite Element Analysis* (FEA) yang dilakukan dalam penelitian mampu memprediksi pengurangan suara/*noise* [20].

## 2. Metode Penelitian

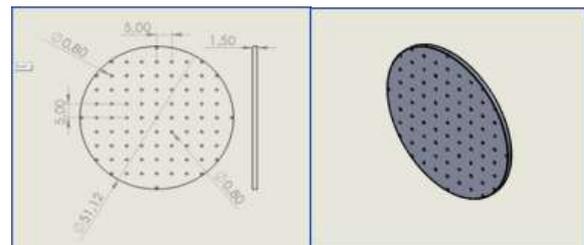
Metode yang digunakan untuk mengumpulkan data atau studi adalah dengan studi literatur dan hasil kajian eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Dinamika Struktur, Universitas Andalas. Metode pada penelitian ini dilakukan dengan cara simulasi numerik dengan menggunakan program Ansys 2019 R3. Untuk mengetahui karakteristik dinamik dari frekuensi suara

yang diberikan terhadap struktur panel hybrid, maka perlu diambil model struktur dan karakteristik akustik dari kajian eksperimental. Mode analisis dan frekuensi respon melalui metode elemen hingga (MEH) akan digunakan sebagai kajian/analisis. Adapun model struktur yang digunakan adalah *micro-perforated panel* (MPP) dan struktur *honeycomb* (HC) dengan data sebagai berikut.

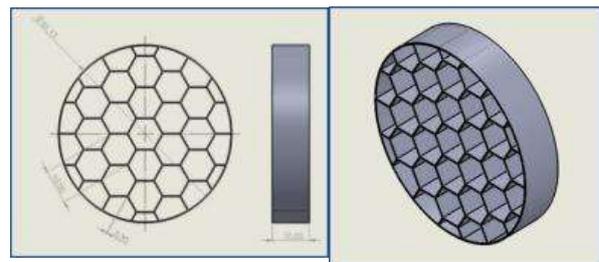
### 2.1. Model Struktur Panel Hybrid

Komponen struktur panel *hybrid* terdiri dari MPP, dan HC. Pada pemodelan struktur panel *hybrid*, digunakan variasi dimensi yaitu ketebalan dari dinding sarang lebah, dan jarak antarlubang pada panel MPP dengan ukuran – ukuran sebagai berikut :

- Model struktur MPP dan HC digunakan berbentuk lingkaran yang berdiameter 51,12 mm.
- Jarak antar lubang pada panel MPP 5 dan 10 mm dengan diameter lubang 0,8 mm memiliki ketebalan 1,5 mm dapat dilihat pada Gambar 6.
- HC dibuat dengan ketebalan 10 mm, variasi tebal dinding 0,3, 0,7 dan 1 mm, dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 6. Ilustrasi MPP dengan diameter 51,12 mm, jarak antar lubang 5 mm dan ketebalan 1,5 mm.



Gambar 7. Ilustrasi Sarang Lebah dengan diameter 51,12 mm, tebal dinding 0,3 mm dan ketebalan inti 10 mm.

### 2.2. Model Material Panel Hybrid

Struktur panel *hybrid* terdiri dari MPP, dan HC dengan data material sebagai berikut:

- Modulus Elastisitas menentukan dari karakteristik dinamik material kaku. Tabel 1 menjelaskan komposisi material kaku *Polyactic Acid* (PLA).

Tabel 1. *Mechanical properties* material PLA

E (MPa)	Poisson's Ratio	B (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)
50	0,39	75,76	18	59,2	54,1

- b. Modulus Elastisitas menentukan dari karakteristik dinamik material fleksibel. Tabel 2, menjelaskan komposisi material fleksibel *Thermal Polyurethane* (TPU).

Tabel 2. *Mechanical properties* material TPU

E (MPa)	Poisson's Ratio	B (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)
5	0,273	3,7	1,95	0,15	0,004

### 2.3. Variasi Dimensi Panel *Hybrid* dan Model Material

Struktur panel *hybrid* yang dibuat dengan variasi dimensi dan modulus elastisitas model material dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Daftar variasi inti sarang lebah dari material TPU dan PLA

Material	Tebal Sarang Lebah (mm)	Tebal Dinding Sarang Lebah (mm)	MPP (mm)
PLA	10	0,3	5
		0,7	
		1	
TPU	10	0,3	10
		0,7	
		1	
PLA TPU	Tanpa Sarang Lebah	0,3	
		0,7	
		1	
PLA	10	0,3	
		0,7	
		1	
TPU	10	0,3	
		0,7	
		1	
PLA TPU	Tanpa Sarang Lebah	0,3	
		0,7	
		1	

### 2.4. Kondisi Batas Pemodelan

Struktur ini akan menerima kondisi batas pada mode dan frekuensi respon analisis diantaranya sebagai berikut:

- Fix support* adalah kondisi batas mode analisis yang diberikan terhadap permukaan ketebalan MPP dan HC bagian luar.
- Pada frekuensi respon, *pressure* yang diberikan sebesar 1 Pa.
- Rentang frekuensi antara 0 – 4000 Hz.

- Karakteristik akustik struktur panel *hybrid* dengan ketebalan MPP 5 dan 10 mm yang pertama adalah koefisien penyerapan suara. Data kajian eksperimental dengan material TPU terdapat pada rentang frekuensi 1300 – 2400 Hz.
- Sedangkan, dengan material PLA terdapat pada rentang frekuensi 1600 – 2600 Hz.
- Karakteristik akustik pada koefisien penyerapan suara MPP dengan ketebalan 5 dan 10 mm tanpa struktur HC yang menggunakan material TPU didapatkan rentang frekuensi 2200 – 2800 Hz.
- Sedangkan dengan menggunakan material PLA didapatkan rentang frekuensi 1500 – 1700 Hz.
- Karakteristik akustik struktur panel *hybrid* dengan ketebalan MPP 5 dan 10 mm yang kedua adalah *Sound Transmission Loss*. Data kajian eksperimental dengan material TPU didapatkan pada rentang frekuensi 1000 – 1500 Hz.
- Sedangkan, dengan material PLA terdapat pada rentang frekuensi 750 – 3300 Hz.
- Karakteristik akustik pada *Sound Transmission Loss* MPP dengan ketebalan 5 dan 10 mm tanpa struktur HC yang menggunakan material TPU didapatkan rentang frekuensi 1600 – 2600 Hz.
- Sedangkan dengan menggunakan material PLA didapatkan rentang frekuensi 2000 – 3800 Hz.

### 2.5 Simulasi Numerik

Penelitian ini dibagi dalam beberapa tahap untuk melakukan proses dari simulasi numerik. Tahapan-tahapan dari simulasi numerik untuk mendapatkan karakteristik dinamik sebagai berikut:

- Membuat model dengan data spesifikasi geometri eksperimental menggunakan perangkat lunak *graphic Solidwork*.
- Setelah model simulasi dibuat, *ekspor file* model ke perangkat lunak analisis *Ansys 2019 R3*. Perangkat lunak analisis *Ansys* yang mengeluarkan hasil data karakteristik dinamik
- Selanjutnya, input model geometri dengan variasi ukuran yang ditentukan dan modulus elastisitas material PLA dan TPU.
- Tahapan berikutnya dengan membentuk *meshing* elemen hingga pada semua *body model*. Model elemen hingga yang digunakan variatif menyesuaikan dengan desain model geometri MPP dan HC.

### 2.6 Metode Elemen Hingga

Model elemen hingga yang dibuat menggunakan perangkat lunak *ANSYS 2019 R3* membutuhkan beberapa tahapan untuk *generate data*, dimana *Workbench* berfungsi sebagai *project schematic* untuk menginput variabel sistem analisis yang digunakan. Topologi *Workbench project schematic* terdiri dari *Engineering Data*, *Geometri*, *Model*, *Set – Up*, *Solution* dan *Results*.

Tipe elemen yang disajikan oleh software ini yaitu *tri mesh*, *quad mesh*, *Hex mesh*, *Tet mesh*, *Hybrid mesh*, *Polyhedral mesh*, dan *Nonconformal mesh*. Pada simulasi ini elemen mesh yang digunakan adalah *Hybrid Mesh*. Proses *mesh generation* sebagai berikut:

1. *Create*
2. *Read (or import) boundary mesh*
3. Melihat kualitas dari *boundary mesh*
4. Tingkatkan dan perbaiki *boundary mesh*
5. *Generate volume mesh*,
6. Sempurnakan mesh jika dibutuhkan
7. Inspeksi kualitas dari *volume mesh* dan *save volume*.

Di dalam mendapatkan karakteristik dinamik menggunakan metode elemen hingga pada mode dan harmonik respon analisis adalah kualitas atau sensitifitas dari *meshing* model panel *hybrid*. Untuk jumlah struktur sel yang sama, *mesh heksahedral* akan memberikan solusi yang lebih akurat, terutama jika garis grid sejajar dengan aliran suara. *Element Sizing Meshing* harus cukup tinggi untuk menangkap semua fitur aliran suara yang relevan. *Generate meshing* yang dilakukan antara MPP dan HC harus cukup halus untuk mengatasi batas aliran suara pada lapisan panel *hybrid* tersebut. Ada beberapa metode untuk mengukur kualitas dari *meshing* yaitu *Skewness*, *Smoothness/Sizing*, dan *Aspect ratio*. Pada penelitian ini digunakan metode *Skewness*, nilai dari *mesh metric spectrum* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai *skewness mesh metric spectrum*

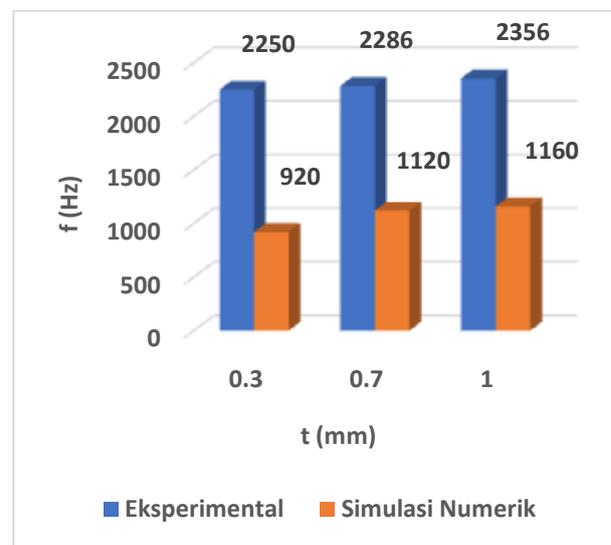
Excellent	Very Good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0 - 0,25	0,25 - 0,5	0,5 - 0,8	0,8 - 0,94	0,95 - 0,97	0,95 - 1,00

### 3. Hasil dan Pembahasan

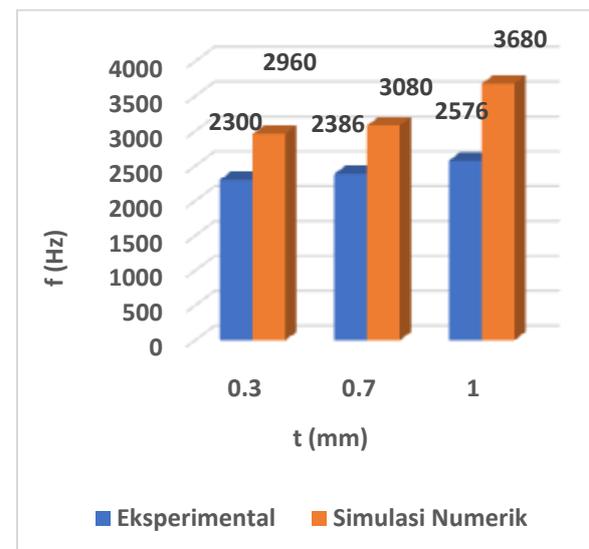
Keterbatasan dari kajian eksperimental dalam memberikan data analisis terhadap karakteristik akustik adalah tahapan yang cukup rumit dan perangkat pengujian yang mahal. Tahapan pada kajian eksperimental terdiri dari skematik tabung *impedence tube* yang dioperasikan menggunakan perangkat lunak *Labview* dan pengolahan hasil data menggunakan perangkat lunak *matlab*. Pengembang melakukan dengan analisis simulasi numerik pada panel *hybrid* tersebut. Mode dan frekuensi respon analisis melalui metode elemen hingga digunakan untuk mendapatkan karakteristik dinamik dengan nilai tolak ukurnya adalah koefisien penyerapan suara dan *Sound Transmission Loss*. Karakteristik akustik panel *hybrid* tersebut diperoleh dari pengolahan kajian eksperimental.

#### 3.1 Frekuensi Respon dan Nilai koefisien penyerapan suara.

Hasil frekuensi respon didapatkan dari tolak ukur nilai koefisien penyerapan suara pada ketebalan HC 10 mm. Variasi ketebalan dinding HC 0,3, 0,7, dan 1 mm, dengan jarak antar lubang MPP adalah 5 mm. Gambar 7 dan 8 menunjukkan grafik hasil dari simulasi mode dan frekuensi respon analisis terhadap tolak ukur koefisien penyerapan suara yang menggunakan material TPU dan PLA. Berdasarkan material yang digunakan dari variasi ketebalan dinding sarang lebah 0,3 mm didapatkan nilai frekuensi untuk material TPU pada 920 Hz dan untuk material PLA pada 2960 Hz, sedangkan pada ketebalan 0,7 mm didapatkan nilai frekuensi untuk material TPU pada 1120 Hz dan untuk material PLA pada 3080 Hz dan diketebalan 1 mm didapatkan frekuensi untuk material TPU pada 1160 Hz dan untuk material PLA pada 3680 Hz.



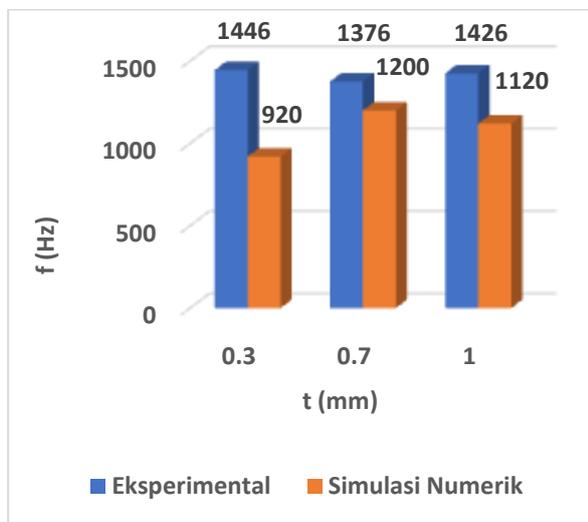
Gambar 7. Grafik korelasi mode dan frekuensi respon analisis dengan koefisien penyerapan suara menggunakan material TPU pada jarak antara lubang MPP 5 mm.



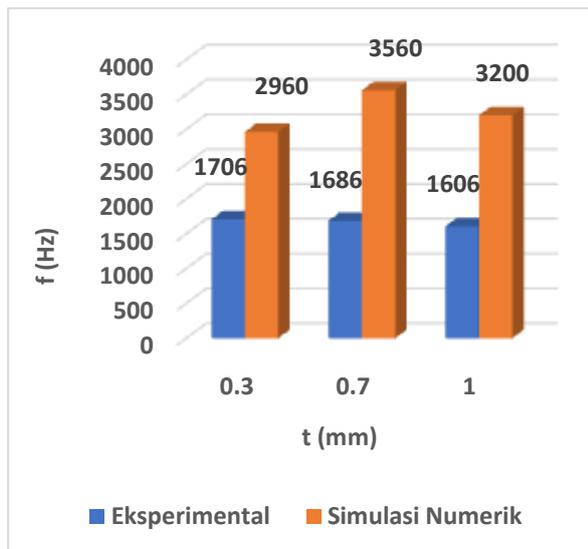
Gambar 8. Grafik korelasi mode dan frekuensi respon analisis dengan koefisien penyerapan suara menggunakan material PLA pada jarak antara lubang MPP 5 mm.

Selanjutnya, hasil frekuensi respon didapatkan dari variasi ketebalan dinding HC 0,3, 0,7, dan 1 mm, dengan jarak antar lubang MPP adalah 10 mm. Gambar 9 dan 10 menunjukkan grafik hasil dari simulasi mode dengan frekuensi respon analisis terhadap tolak ukur koefisien penyerapan suara menggunakan material TPU dan PLA. Berdasarkan material yang digunakan dari variasi ketebalan dinding sarang lebah 0,3 mm didapatkan nilai frekuensi untuk material TPU pada 920 Hz dan untuk material PLA pada 2960 Hz, sedangkan pada ketebalan 0,7 mm didapatkan nilai frekuensi untuk material TPU pada 1200 Hz dan untuk material PLA pada 3560 Hz dan diketebalan 1 mm didapatkan frekuensi untuk material TPU pada 1120 Hz dan untuk material PLA pada 3200 Hz.

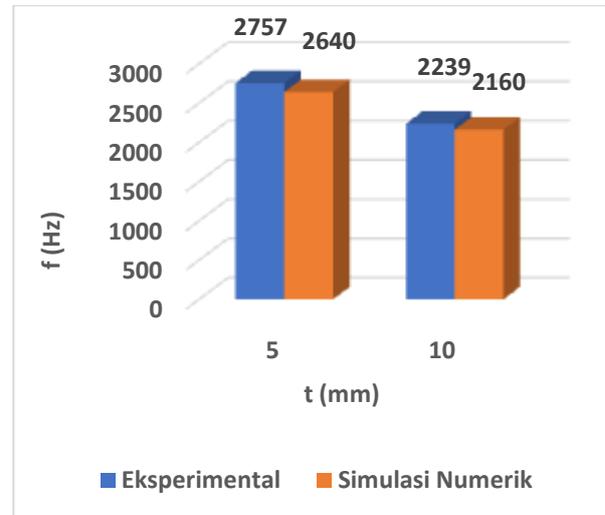
Grafik hasil frekuensi respon dengan tolak ukur nilai koefisien penyerapan suara tanpa menggunakan HC pada variasi jarak antar lubang MPP 5 dan 10 mm ditunjukkan pada Gambar 11 dan 12. Simulasi numerik dari mode dan frekuensi respon analisis terhadap tolak ukur koefisien penyerapan suara memakai material TPU dan PLA. Berdasarkan material tersebut variasi jarak antar lubang MPP digunakan 5 mm, didapatkan nilai frekuensi untuk material TPU pada 2640 Hz dan untuk material PLA pada 1560 Hz, sedangkan jarak antar lubang MPP 10 mm didapatkan nilai frekuensi untuk material TPU pada 2160 Hz dan untuk material PLA pada 1840 Hz.



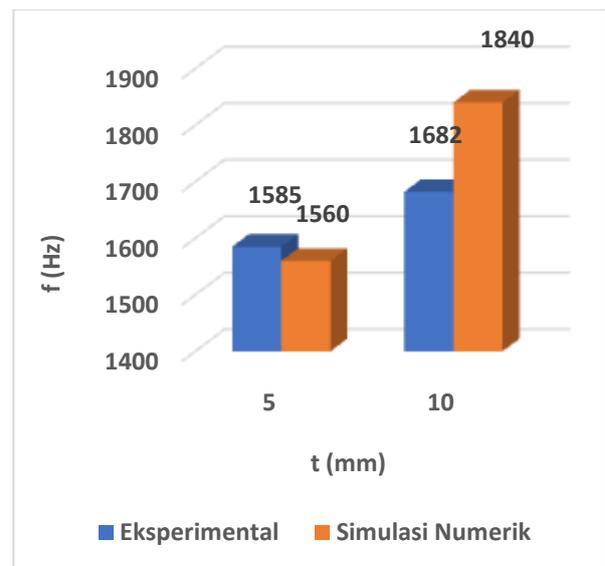
Gambar 9. Grafik korelasi mode dan frekuensi respon analisis dengan koefisien penyerapan suara menggunakan material TPU pada jarak antara lubang MPP 10 mm



Gambar 10. Grafik korelasi mode dan frekuensi respon analisis dengan koefisien penyerapan suara menggunakan material PLA pada jarak antara lubang MPP 10 mm



Gambar 11. Grafik korelasi pada mode dan frekuensi respon dengan koefisien penyerapan suara menggunakan material TPU tanpa struktur HC

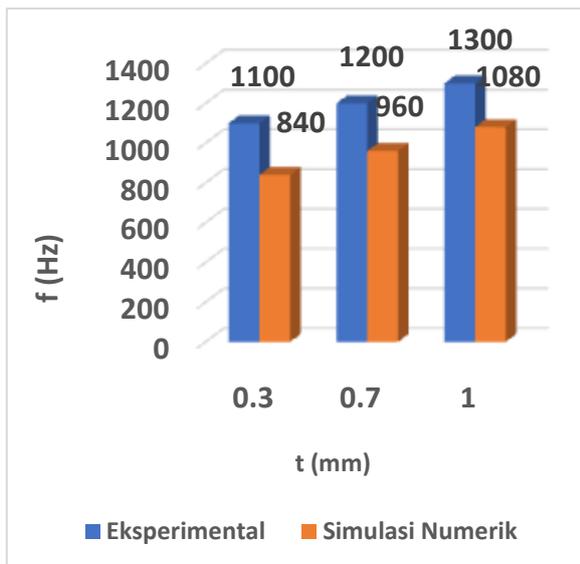


Gambar 12. Grafik korelasi pada mode dan frekuensi respon dengan koefisien penyerapan suara menggunakan material TPU tanpa struktur HC

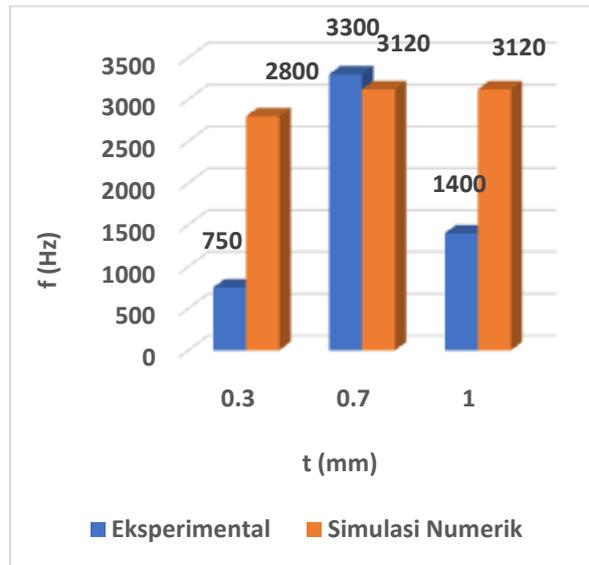
### 3.2 Frekuensi Respon dan Nilai *Sound Transmission Loss*

Hasil frekuensi respon didapatkan dari tolak ukur nilai *Sound Transmission Loss* pada ketebalan HC 10 mm. Variasi ketebalan dinding HC 0,3, 0,7, dan 1 mm, dengan jarak antar lubang MPP adalah 5 mm. Gambar 13 dan 14 menunjukkan grafik hasil dari simulasi mode dan frekuensi respon analisis terhadap tolak ukur *Sound Transmission Loss* menggunakan material TPU dan PLA. Berdasarkan material yang digunakan dari variasi ketebalan dinding sarang lebah 0,3 mm didapatkan nilai frekuensi untuk material TPU pada 840 Hz dan untuk material PLA pada 2800 Hz, sedangkan pada ketebalan 0,7 mm didapatkan nilai frekuensi untuk material TPU pada 960 Hz dan untuk material PLA pada 3120 Hz dan diketebalan 1 mm didapatkan frekuensi untuk material TPU pada 1080 Hz dan untuk material PLA pada 3120 Hz.

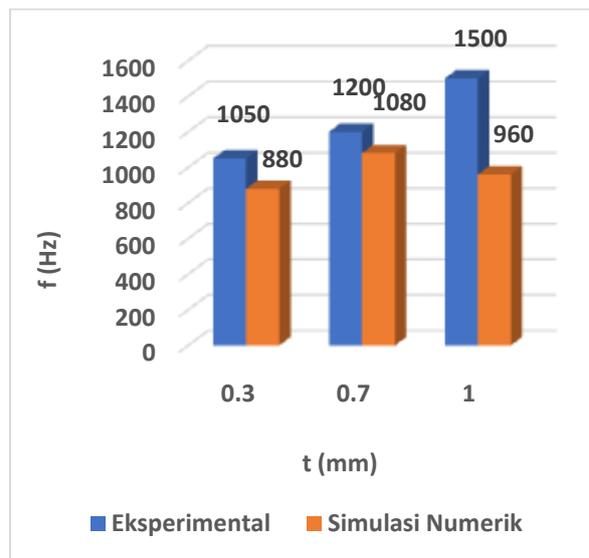
Selanjutnya, hasil frekuensi respon didapatkan dari variasi ketebalan dinding HC 0,3, 0,7, dan 1 mm, dengan jarak antar lubang MPP adalah 10 mm. Gambar 15 dan 16 menunjukkan grafik hasil dari simulasi mode dan frekuensi respon analisis terhadap tolak ukur *Sound Transmission Loss* menggunakan material TPU dan PLA. Berdasarkan material yang digunakan variasi ketebalan dinding sarang lebah 0,3 mm didapatkan nilai frekuensi untuk material TPU pada 880 Hz dan untuk material PLA pada 1050 Hz, sedangkan pada ketebalan 0,7 mm didapatkan nilai frekuensi untuk material TPU pada 1080 Hz dan untuk material PLA pada 1200 Hz dan diketebalan 1 mm didapatkan frekuensi untuk material TPU pada 960 Hz dan untuk material PLA pada 1300 Hz.



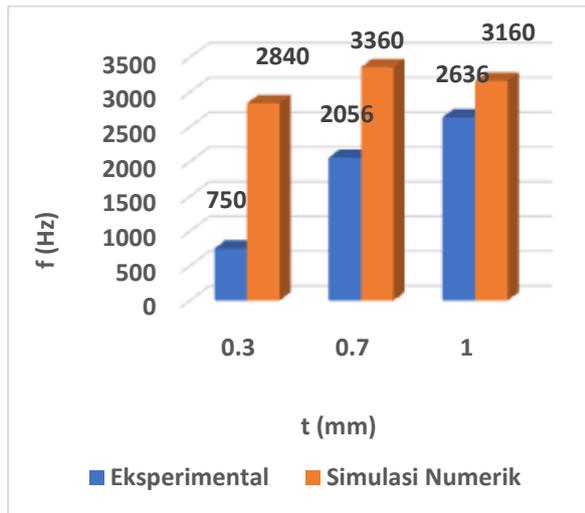
Gambar 13. Grafik korelasi pada mode dan frekuensi respon analisis dengan *Sound Transmission Loss* menggunakan material TPU dengan jarak antara lubang MPP 5 mm



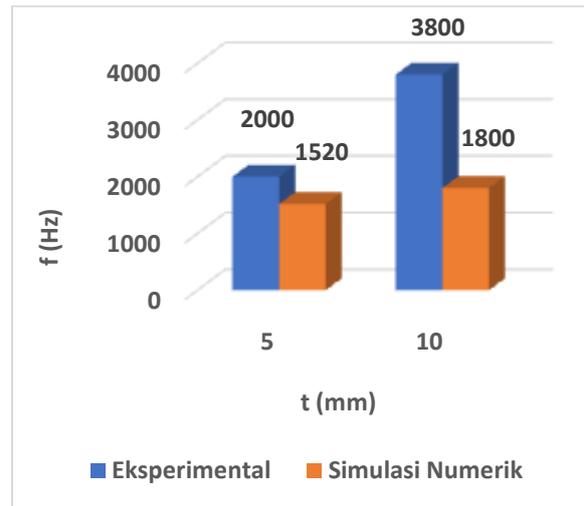
Gambar 14. Grafik korelasi pada mode dan frekuensi respon analisis dengan *Sound Transmission Loss* menggunakan material PLA dengan jarak antara lubang MPP 5 mm



Gambar 15. Grafik korelasi pada mode dan frekuensi respon analisis dengan *Sound Transmission Loss* menggunakan material TPU dengan jarak antara lubang MPP 10 mm

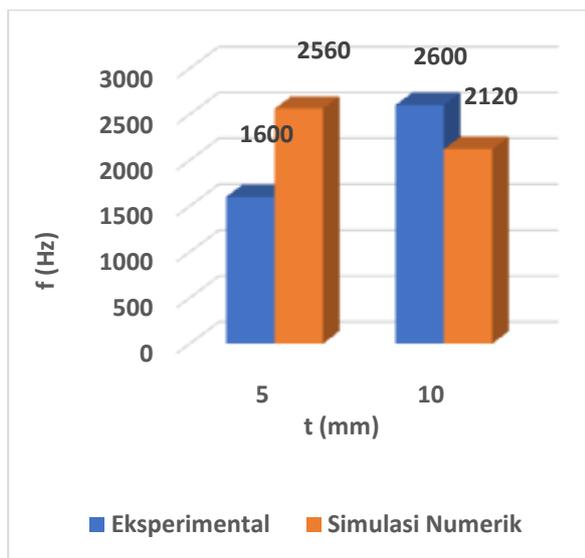


Gambar 16. Grafik korelasi pada mode dan frekuensi respon dengan *Sound Transmisson Loss* menggunakan material PLA dengan jarak antara lubang MPP 10 mm.



Gambar 18. Grafik korelasi pada mode dan frekuensi respon dengan *Sound Transmisson Loss* menggunakan material PLA dengan jarak antara lubang MPP 10 mm tanpa menggunakan struktur HC.

Hasil frekuensi respon didapatkan dari tolak ukur nilai *Sound Transmisson Loss* tanpa menggunakan HC variasi yang digunakan adalah jarak antar lubang MPP 5 dan 10 mm. Gambar 17 dan 18 menunjukkan grafik hasil dari simulasi mode dan frekuensi respon analisis terhadap tolak ukur *Sound Transmisson Loss* menggunakan material TPU dan PLA. Berdasarkan material yang digunakan dari variasi jarak antar lubang MPP 5 mm. didapatkan nilai frekuensi untuk material TPU pada 2560 Hz dan untuk material PLA pada 1520 Hz, sedangkan jarak antar lubang MPP 10 mm didapatkan nilai frekuensi untuk material TPU pada 2120 Hz dan untuk material PLA pada 1800 Hz.



Gambar 17. Grafik korelasi pada mode dan frekuensi respon dengan *Sound Transmisson Loss* menggunakan material TPU dengan jarak antara lubang MPP 10 mm tanpa menggunakan struktur HC

### 3.3 Hasil korelasi pada karakteristik akustik dan dinamik.

#### 3.3.1 Korelasi antara harmonik respon dengan koefisien penyerapan suara.

Hasil penelitian korelasi antara harmonik response dan nilai koefisien penyerapan suara dapat disimpulkan dengan tebal HC 10 mm, variasi ketebalan dinding HC 0,3 mm, 0,7 mm dan 1 mm, dengan jarak antar lubang MPP 5 mm bahwa material fleksibel (TPU) memiliki nilai frekuensi respon lebih rendah daripada menggunakan material kaku (PLA) dan variasi berdasarkan tebal dinding HC nilai frekuensi meningkat apabila tebal dinding meningkat.

Selanjutnya, hasil penelitian dari variasi ketebalan dinding HC 0,3 mm, 0,7 mm dan 1 mm, dengan jarak antar lubang MPP 10 mm bahwa material fleksibel (TPU) memiliki nilai frekuensi response lebih rendah daripada menggunakan material kaku (PLA) dan variasi berdasarkan tebal dinding HC nilai frekuensi meningkat apabila tebal dinding meningkat, namun pada hasil eksperimen mengalami penurunan yang tidak terlalu signifikan.

Sedangkan, hasil penelitian dari variasi jarak antar lubang MPP 5 mm dan 10 mm tanpa menggunakan struktur HC bahwa pada simulasi material fleksibel (TPU) memiliki nilai frekuensi respon lebih rendah daripada menggunakan material kaku (PLA), sedangkan pada hasil eksperimen untuk bahan TPU memiliki perubahan relatif tinggi. Pada simulasi numerik jarak antar lubang MPP semakin besar nilai frekuensi meningkat, namun pada hasil eksperimen mengalami penurunan jika jarak antar lubang meningkat.

3.3.2 Korelasi antara harmonik respon dengan koefisien *sound transmission loss*.

Hasil penelitian korelasi antara harmonik respon dan nilai *sound transmission loss* (STL) dengan ketebalan tebal HC 10 mm, variasi ketebalan dinding HC 0,3 mm, 0,7 mm dan 1 mm, dengan jarak antar lubang MPP 5 mm bahwa material fleksibel (TPU) memiliki nilai frekuensi lebih rendah daripada menggunakan material kaku (PLA) dan variasi berdasarkan tebal dinding HC nilai frekuensi meningkat apabila tebal dinding meningkat, namun pada eksperimen terjadi kenaikan di tebal dinding 0,7 mm hal ini bisa terjadi karena pengambilan data kurang efektif.

Selanjutnya, hasil penelitian dari variasi ketebalan dinding HC 0,3 mm, 0,7 mm dan 1 mm, dengan jarak antar lubang MPP 10 mm bahwa material fleksibel (TPU) memiliki nilai frekuensi respon lebih rendah daripada menggunakan material kaku (PLA) dan variasi berdasarkan tebal dinding HC nilai frekuensi meningkat apabila tebal dinding meningkat.

Sedangkan, hasil penelitian dari harmonik respon dan simulasi nilai *sound transmission loss* (STL) disimpulkan dengan jarak antar lubang MPP 5 mm dan 10 mm tanpa menggunakan struktur HC, bahwa pada simulasi material fleksibel (TPU) memiliki nilai frekuensi lebih rendah daripada menggunakan material kaku (PLA). Pada simulasi numerik jarak antar lubang MPP semakin besar nilai frekuensi meningkat.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini telah melakukan pengembang metode analisis data dengan menggunakan simulasi numerik pada panel *hybrid* penyerapan suara melalui metode elemen hingga. Mode dan frekuensi respon analisis digunakan untuk mendapatkan karakteristik dinamik dengan nilai tolak ukurnya adalah koefisien penyerapan suara dan *Sound Transmission Loss*. Karakteristik akustik panel *hybrid* tersebut diperoleh dari pengolahan kajian eksperimental. Pengembangan yang dilakukan untuk mempermudah tahapan dari hasil kajian eksperimental dengan metode simulasi numerik. Pemodelan yang telah dilakukan terhadap korelasi mode dan frekuensi respon analisis dengan koefisien penyerapan suara dan *sound transmission loss* pada panel *hybrid* didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Korelasi mode dan frekuensi respon analisis dengan koefisien penyerapan suara dan *Sound Transmission Loss* menggunakan material TPU dan PLA adalah sebagai tolak ukur dari pengembangan kajian eksperimental dengan metode simulasi numerik.
2. Rentan nilai frekuensi yang didapatkan dengan korelasi kedua karakteristik tersebut adalah sama antara kajian eksperimental dengan analisis simulasi numerik.

3. Pengembangan metode analisis simulasi numerik ini dapat digunakan untuk memberikan efisiensi pada tahapan pengujian eksperimental.
4. Karakteristik dinamik yang didapatkan memiliki persamaan pada rentan frekuensi nilai rendah dan tingginya frekuensi karakteristik akustik.
5. Nilai pada setiap variasi ketebalan struktur dengan modulus elastisitas material fleksibel dan kaku menghasilkan frekuensi yang berbeda. Secara keseluruhan dari kondisi batas tidak begitu signifikan naik turunnya frekuensi yang dihasilkan.

#### 5. Daftar Rujukan

- [1] P. N. Breyse and P. S. J. Lees, "Noise and decibels," *Johns Hopkins Univ.*, 2006.
- [2] International Labour Organization, "General information How does noise affect our hearing? How do you know if the noise level in the factory is too high?," no. 3, pp. 1-6, 2019.
- [3] D. & Sugiharto, "Kebisingan Dan Gangguan Psikologis Pekerja Weaving Loom Dan Inspection Pt. Primatexco Indonesia," *JHE (Journal Heal. Educ.*, vol. 2, no. 2, pp. 130-137, 2017.
- [4] D. Takahashi, "A new method for predicting the sound absorption of perforated absorber systems," *Appl. Acoust.*, vol. 51, no. 1, pp. 71-84, 1997, doi: 10.1016/S0003-682X(96)00070-9.
- [5] J. Carbajo, J. Ramis, L. Godinho, and P. Amado-Mendes, "Perforated panel absorbers with micro-perforated partitions," *Appl. Acoust.*, vol. 149, pp. 108-113, 2019, doi: 10.1016/j.apacoust.2019.01.023.
- [6] S. Xie, D. Wang, Z. Feng, and S. Yang, "Sound absorption performance of microperforated honeycomb metasurface panels with a combination of multiple orifice diameters," *Appl. Acoust.*, vol. 158, p. 107046, 2020, doi: 10.1016/j.apacoust.2019.107046.
- [7] Y. Yang, B. R. Mace, and M. J. Kingan, "A wave and finite element based homogenised model for predicting sound transmission through honeycomb panels," *J. Sound Vib.*, vol. 463, p. 114963, 2019, doi: 10.1016/j.jsv.2019.114963.
- [8] S. Upreti, V. K. Singh, S. K. Kamal, A. Jain, and A. Dixit, "Modelling and analysis of honeycomb sandwich structure using finite element method," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.377.
- [9] N. N. Najib, Z. M. Ariff, A. A. Bakar, and C. S. Sipaut, "Correlation between the acoustic and dynamic mechanical properties of natural rubber foam: Effect of foaming temperature," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 2, pp. 505-511, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.08.030.
- [10] S. Li, X. Li, Z. Wang, G. Wu, G. Lu, and L. Zhao, "Finite element analysis of sandwich panels with stepwise graded aluminum honeycomb cores under blast loading," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 80, pp. 1-12, 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.09.025.
- [11] D. Asprone, F. Auricchio, C. Menna, S. Morganti, A. Prota, and A. Reali, "Statistical finite element analysis of the buckling behavior of honeycomb structures," *Compos. Struct.*, vol. 105, pp. 240-255, 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.05.014.
- [12] S. W. Rienstra and A. Hirschberg, "An Introduction to Acoustics," *Phys. Today*, vol. 5, no. 11, p. 24, 1952, doi: 10.1063/1.3067395.

- [13] J. P. Mattei, "Acoustical Engineering.," *Proc. - Int. Conf. Noise Control Eng.*, pp. 59–63, 1981, doi: 10.1063/1.3060138.
- [14] F. A. Everest and K. C. Pohlmann, *Master Handbook of Acoustics*, vol. 7, no. 11. 2015.
- [15] W. Guo and H. Min, "A compound micro-perforated panel sound absorber with partitioned cavities of different depths," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1617–1622, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.238.
- [16] F. Bucciarelli, G. P. Malfense Fierro, and M. Meo, "A multilayer microperforated panel prototype for broadband sound absorption at low frequencies," *Appl. Acoust.*, vol. 146, pp. 134–144, 2019, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.11.014.
- [17] J. Carbajo, J. Ramis, L. Godinho, P. Amado-Mendes, and J. Alba, "A finite element model of perforated panel absorbers including viscothermal effects," *Appl. Acoust.*, vol. 90, pp. 1–8, 2015, doi: 10.1016/j.apacoust.2014.10.013.
- [18] J. D. Jung, S. Y. Hong, J. H. Song, and H. W. Kwon, "Acoustic insulation performance of a honeycomb panel using a transfer matrix method," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, vol. 232, no. 4, pp. 392–401, 2018, doi: 10.1177/1475090217703467.
- [19] O. Onen and M. Caliskan, "Design of a single layer micro-perforated sound absorber by finite element analysis," *Appl. Acoust.*, vol. 71, no. 1, pp. 79–85, 2010, doi: 10.1016/j.apacoust.2009.07.012.
- [20] A. Arjunan *et al.*, "Development of a 3D finite element acoustic model to predict the sound reduction index of stud based double-leaf walls," *J. Sound Vib.*, vol. 333, no. 23, pp. 6140–6155, 2014, doi: 10.1016/j.jsv.2014.06.032.
-