

**TUGAS AKHIR - TM184835**

**DESAIN DAN ANALISIS RESPON STATIS DAN DINAMIS  
PADA CASING BATTERY PACK DENGAN  
MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**M FARREL BAIHAQI RAMA**

**NRP 02111740000155**

Dosen Pembimbing

**Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng**

**NIP 197505111999031001**

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022





**TUGAS AKHIR - TM184835**

**DESAIN DAN ANALISIS RESPON STATIS DAN DINAMIS  
PADA CASING BATTERY PACK DENGAN  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**M FARREL BAIHAQI RAMA**

**NRP 02111740000155**

Dosen Pembimbing

**Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.**

**NIP 197505111999031001**

**Program Studi Sarjana**

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknikologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022





**FINAL PROJECT - TW184835**

**DESIGN AND ANALYSIS OF STATIC AND DYNAMIC  
RESPONSE OF BATTERY PACK CASE USING FINITE  
ELEMENT METHOD**

**M FARREL BAIHAQI RAMA**

**NRP 02111740000155**

Advisor

**Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.**

**NIP 197505111999031001**

**Study Program Bachelor's Degree**

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and System Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



## HALAMAN PENGESAHAN

### DESAIN DAN ANALISIS RESPON STATIS DAN DINAMIS PADA CASING BATTERY PACK DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada

Program Studi S-1 Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **M FARREL BAIHAQI RAMA**

NRP. 02111740000155

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng. Pembimbing
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T.,M.T. Penguji
3. Aida Annisa Amin Daman, S.T.,M.T. Penguji
4. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D. Penguji



**SURABAYA**

**Agustus, 2022**





## APPROVAL SHEET

### DESIGN AND ANALYSIS OF STATIC AND DYNAMIC RESPONSE OF BATTERY PACK CASE USING FINITE ELEMENT METHOD



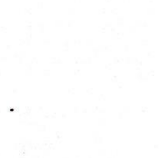

#### TUGAS AKHIR

Submitted to fulfill one of the requirements  
For obtaining a degree Bachelor of Engineering at  
Undergraduate Study Program of Bachelor Degree  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **M FARREL BAIHAQI RAMA**

NRP. 02111740000155

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Prof. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.  Advisor
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.  Examiner
3. Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T.  Examiner
4. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D.  Examiner

**SURABAYA**

**August, 2022**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : M Farrel Baihaqi Rama / 02111740000155

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing / NIP : Prof. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur. S.T., M.Eng /  
197505111999031001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Desain dan Analisis Respon Statis dan Dinamis pada Casing Battery Pack dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing



(Prof. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur. S.T., M.Eng)  
NIP. 197505111999031001

Mahasiswa,

(M Farrel Baihaqi Rama)  
NRP.02111740000155

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : M Farrel Baihaqi Rama / 02111740000155  
Department : Teknik Mesin  
Advisor / NIP : Prof. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur. S.T., M.Eng /  
197505111999031001

hereby declare that the Final Project with the title of “Design and Analysis of Static And Dynamic Response of Battery Pack Case Using Finite Element Method” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 July 2022

Acknowledged

Advisor



(Prof. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur. S.T., M.Eng)  
NIP. 197505111999031001

Student



(M Farrel Baihaqi Rama)  
NRP.02111740000155

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# DESAIN DAN ANALISIS RESPON STATIS DAN DINAMIS PADA CASING BATTERY PACK DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

**Nama Mahasiswa** : M Farrel Baihaqi Rama  
**NRP** : 02111740000155  
**Departemen** : Teknik Mesin FTIRS-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

## ABSTRAK

Saat ini perkembangan kendaraan listrik di Indonesia berkembang sangat pesat. Dari data yang dihimpun Kementerian Perhubungan (Kemenhub) mencatat kendaraan listrik di Indonesia berjumlah 14.400 unit pada pertengahan Nopember 2021. Hal ini membuat Departemen Teknik Mesin ITS melakukan penelitian tentang kendaraan elektrik roda dua. Dimana pada laboratorium Rekayasa Vibrasi dan Sistem Otomotif meneliti dan mengembangkan *electric scooter*. *Electric scooter* ini menggunakan sumber energi dari baterai. Komponen baterai kendaraan listrik ini terdiri dari *Battery cell*, *Battery module* dan *Battery pack*. Desain *casing battery pack* yang tidak memadai akan menyebabkan banyak masalah seperti keretakan, kebisingan atau kerusakan baterai. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah metode analisis untuk mengetahui kerusakan tersebut yaitu *finite element analysis*. Metode ini dapat menyelesaikan berbagai analisa seperti vibrasi, statik struktural, dan lainnya. Penggunaan metode elemen hingga ini menggunakan *software ANSYS Workbench 2020 R2*.

Pada penelitian tugas akhir kali ini dilakukan analisis statis dan dinamis pada *battery pack*. Pada penelitian ini digunakan material *structural steel* dan *aluminium alloy*. Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga pada *software ANSYS Workbench 2020 R2* untuk melakukan pengujian *static structural* untuk pembebanan statis yang akan menghasilkan nilai *equivalent stress von-mises*, *modal analysis* untuk mengetahui frekuensi natural dan *mode shape*, dan *harmonic response analysis* untuk mengetahui pembebanan dinamis akibat getaran yang berlebihan dan mendapatkan grafik *frequency response*.

Pada pengujian statis untuk *casing battery pack* menggunakan material *structural steel* memiliki *stress* maksimum sebesar 0,46197 MPa dan deformasi maksimum 0,000025317 mm. Pada material *aluminium alloy* *stress* maksimum sebesar 0,45965 MPa dan deformasi maksimum 0,000071201 mm. Pada pengujian dinamis untuk kondisi 1 material *structural steel* dihasilkan amplitudo sebesar 0,97638 mm/s dan *Stress* maksimum sebesar 1,3025 MPa. Pada material *aluminium alloy* amplitudo sebesar 0,94012 mm/s dan *Stress* maksimum sebesar 0,57416 MPa. Pada kondisi 2 material *structural steel* dihasilkan amplitudo sebesar 3,3092 mm/s dan *Stress* maksimum sebesar 1,3707 MPa. Pada material *aluminium alloy* amplitudo sebesar 0,54377 mm/ dan *Stress* maksimum sebesar 0,67462 MPa. Pada kondisi 3 material *structural steel* dihasilkan amplitudo sebesar 0,97982 mm/s dan *Stress* maksimum sebesar 1,3861 MPa. Pada material *aluminium alloy* amplitudo sebesar 0,94327 mm/s dan *Stress* maksimum sebesar 0,63474 MPa. *Casing battery pack* dengan menggunakan material *Structural Steel* lebih disarankan dibandingkan dengan material *Alluminium Alloy* dikarenakan *stress* maksimum yang didapatkan lebih besar dan deformasi yang didapatkan lebih kecil.

**Kata Kunci** : *Casing Battery Pack*, *finite element analysis*, pembebanan statis, pembebanan dinamis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# DESIGN AND ANALYSIS OF STATIC AND DYNAMIC RESPONSE OF BATTERY PACK CASE USING FINITE ELEMENT METHOD

**Name** : M Farrel Baihaqi Rama  
**NRP** : 02111740000155  
**Department** : Mechanical Engineering FTIRS-ITS  
**Advisor** : Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

## ABSTRACT

Currently, the development of electric vehicles in Indonesia is growing very rapidly. From data compiled by the Ministry of Transportation (Kemenhub), there are 14,400 electric vehicles in Indonesia in mid-November 2021. This makes the ITS Mechanical Engineering Department conduct research on two-wheeled electric vehicles. Where in the Laboratory of Vibration Engineering and Automotive Systems researching and developing electric scooters. This electric scooter uses an energy source from a battery. The battery components of this electric vehicle consist of a battery cell, a battery module and a battery pack. Inadequate battery pack casing design will cause many problems such as cracking, noise or battery damage. Therefore, an analytical method is needed to determine the damage, namely finite element analysis. This method can solve various analyzes such as vibration, structural static, and others. The use of the finite element method uses the ANSYS Workbench 2020 R2 software.

In this final project, static and dynamic analyzes were carried out on the battery pack. In this study, structural steel and aluminum alloy materials were used. This study uses the finite element method in ANSYS Workbench 2020 R2 software to perform static structural testing for static loading which will produce an equivalent von-mises stress value, modal analysis to determine natural frequency and mode shape, and harmonic response analysis to determine dynamic loading due to vibration. redundant and get a frequency response graph.

In the static test for the battery pack casing using structural steel material has a maximum stress of 0.46197 MPa and a maximum deformation of 0.00025317 mm. In the aluminum alloy material the maximum stress is 0.45965 MPa and the maximum deformation is 0.00071201 mm. In dynamic testing for condition 1 structural steel material, an amplitude of 0.97638 mm/s and a maximum stress of 1.3025 MPa are produced. In the aluminum alloy material, the amplitude is 0.94012 mm/s and the maximum stress is 0.57416 MPa. In the condition of 2 structural steel materials, the amplitude is 3.3092 mm/s and the maximum stress is 1.3707 MPa. In the aluminum alloy material, the amplitude is 0.54377 mm/ and the maximum stress is 0.67462 MPa. In the condition of 3 structural steel materials, the amplitude is 0.97982 mm/s and the maximum stress is 1.3861 MPa. In the aluminum alloy material, the amplitude is 0.94327 mm/s and the maximum stress is 0.63474 MPa. Battery pack casing using Structural Steel material is recommended compared to Aluminum Alloy material because the maximum stress obtained is greater and the deformation obtained is smaller.

**Keywords:** Battery Pack casing, *finite element analysis*, static loading, dynamic loading.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur alhamdulillah saya panjatkan kepada Allah SWT karena telah melimpahkan rahmat dan hidayahnya kepada saya. Sehingga saya dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “Desain dan Analisis Respon Statis dan Dinamis pada Casing Battery Pack dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga”.

Penulis telah banyak memperoleh dukungan serta bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua penulis, **Roviandi Rama** dan **Susyanti Eka putri** yang selalu memberikan dukungan baik material, moril, serta doa.
2. Bapak **Prof. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.** selaku Dosen Pembimbing yang telah menyempatkan waktunya untuk membimbing, memberikan motivasi, serta ilmu dalam menunjang laporan Tugas Akhir.
3. Ibu **Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.**, Ibu **Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T.**, dan Bapak **Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D.** selaku dosen penguji dalam sidang Tugas Akhir penulis yang telah memberikan kritik dan saran untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Ibu **Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.**, selaku Dosen Wali yang telah membimbing selama perkuliahan.
5. **Ketut krisna Dana** dan Mbak **Amanda** yang sangat membantu penulis dalam proses penyusunan tugas akhir ini dari awal sampai akhir.
6. **Puts, Adit, Sauki, Gerry, Mex, Bot, Riyan, Irfan, Gde Made, Farlen, Anto, Alfin** dan teman-teman angkatan **M60** yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu, menemani penulis dalam mengenal dan beradaptasi pada lingkungan baru serta menjadi teman yang terbaik.
7. **Ghozy, Jay, Faqih, Kelpo, Arighi, Denyta** yang selalu memberikan semangat dan hiburan kepada penulis dari awal sampai akhir penyusunan tugas akhir ini.
8. **Supri, Galih, Bintang, Afif, Jonathan, Budari, Naufal, Figo, Ari, Tepe, Ivan, Oci, khrisnadi, Pantar, Reza, Hero** dan teman teman kos panglima yang selalu menemani dan menghibur penulis disaat lelah dalam proses penyusunan tugas akhir ini.
9. Mas/Mbak dan Adik-adik **SMRM** yang tidak bisa saya sebutkan satu-persatu, yang mau ngobrol dan bercanda dengan penulis.
10. Teman-teman Keluarga Mahasiswa **Teluse** yang menjadi rumah ketiga penulis yang senantiasa menemani, menghibur, dan menyemangati penulis.
11. Dan seluruh pihak lain yang senantiasa memberikan dukungan, namun penulis tidak dapat menyebutkan satu persatu.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi positif dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi para pembaca.

Surabaya, 29 Juli 2022

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

JUDUL PROPOSAL.....	i
PERNYATAAN ORISINALITAS .....	viii
STATEMENT OF ORIGINALITY .....	x
ABSTRAK.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
KATA PENGANTAR .....	xvi
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xxi
DAFTAR TABEL.....	xxvi
BAB I PENDAHULUAN.....	2
1.1 Latar Belakang.....	2
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II DASAR TEORI .....	4
2.1 Kendaraan listrik .....	4
2.2 Baterai.....	4
2.3 Battery Pack.....	5
2.3.1 Battery Cell.....	5
2.3.2 Holder .....	5
2.3.3 Connector .....	6
2.3.4 Battery Module .....	6
2.3.5 <i>Casing</i> .....	7
2.4 Konsep regangan .....	7
2.5 Konsep tegangan .....	8
2.5.1 Tegangan <i>Von Mises</i> .....	9
2.6 Hubungan tegangan dan regangan.....	10
2.7 Safety factor.....	10
2.8 Getaran .....	11
2.8.1 Multi degree of Freedom Vibration.....	11
2.8.2 Base Motion Vibration .....	13

2.9	Finite Element Method (FEM).....	15
2.10	Meshing.....	16
2.11	Kajian Pustaka Terdahulu .....	17
2.11.1	Penelitian Mengenai Model Analisis <i>Battery pack</i> .....	17
2.11.2	Penelitian Mengenai Dynamic dan Static Analysis pada Battery Box.....	18
2.11.3	Penelitian Tentang Modal Analisis.....	22
2.11.4	Penelitian tentang Simulasi dan Optimasi Battery Pack .....	24
BAB III METODOLOGI .....		28
3.1	Diagram Alir Pengujian .....	28
3.2	Penjelasan diagram Alir .....	29
3.2.1	Studi Literatur .....	29
3.2.2	Pengumpulan Data yang Dibutuhkan .....	29
3.2.2.1	Material .....	30
3.2.2.2	FBD dan Model Dinamis .....	31
3.2.2.2.1	Model dinamis setengah kendaraan .....	31
3.2.3	Pre-Processing.....	34
3.2.3.1	Model Geometri Battery Pack .....	34
3.2.3.2	Proses import geometri battery pack.....	35
3.2.3.3	Mesh.....	36
3.2.3.3.1	Uji Konvergensi Meshing .....	38
3.2.4	Tahap processing.....	40
3.2.4.1	Pengujian Statis (Static Structural) .....	40
3.2.4.1.1	Beban statis pada battery pack .....	41
3.2.4.1.2	Batas kondisi dan pembebanan pada battery pack .....	42
3.2.4.1.3	Solution .....	43
3.2.4.1.4	Modal Analysis.....	43
3.2.4.2	Pengujian Dinamis .....	44
3.2.5	Post Processing .....	47
3.2.6	Kesimpulan .....	47
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN .....		48
4.1	Hasil Static Structural .....	48
4.1.1	Desain casing battery pack.....	48
4.1.1.1	Hasil Equivalent Stress dan Total Deformation casing battery pack material Structural Steel .....	48

4.1.1.2 Hasil Equivalent Stress dan Total Deformation casing battery pack material aluminium alloy .....	49
4.1.2 Analisis Data Simulasi Statis.....	50
4.2 Modal Analisis .....	51
4.2.1 Frekuensi Natural Material Structural Steel .....	52
4.2.2 Frekuensi Natural Material Alluminium Alloy .....	53
4.3 Pengujian Dinamis .....	54
4.3.1 Harmonic Analysis .....	54
4.3.1.1 Kondisi Jalan Bergelombang dan Berbelok Tajam.....	54
4.3.1.1.1 Equivalent Stress.....	55
4.3.1.1.2 Directional Deformation .....	57
4.3.1.1.3 Respon Dinamis .....	63
4.3.1.2 Kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat.....	63
4.3.1.2.1 Equivalent stress.....	64
4.3.1.2.2 Directional Deformation.....	66
4.3.1.2.3 Respon Dinamis .....	72
4.3.1.3 Kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok .....	72
4.3.1.3.1 Equivalent stress .....	73
4.3.1.3.2 Directional Deformation.....	75
4.3.1.3.3 Respon Dinamis .....	81
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	82
5.1 Kesimpulan.....	82
5.2 Saran.....	83
DAFTAR PUSTAKA .....	84
LAMPIRAN.....	86
BIODATA PENULIS .....	119

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Battery cell .....	5
<b>Gambar 2. 2</b> Holder Baterai .....	6
<b>Gambar 2. 3</b> Connector dengan nikel tembaga .....	6
<b>Gambar 2. 4</b> Battery Module.....	7
<b>Gambar 2. 5</b> Casing battery pack .....	7
<b>Gambar 2. 6</b> Perubahan bentuk karena beban Tarik (Russel Hibbeler,2017) .....	8
<b>Gambar 2. 7</b> komponen tegangan (Russel Hibbeler,2017).....	9
<b>Gambar 2. 8</b> komponen tegangan dalam 3D .....	9
<b>Gambar 2. 9</b> kurva tegangan dan regangan pada material .....	10
<b>Gambar 2. 10</b> sistem dinamis multi degree of freedom (Wiwiek, 2010).....	12
<b>Gambar 2. 11</b> (a) Base Excitation (b) Base Excitation Free Body Diagram.....	14
<b>Gambar 2. 12</b> Grafik hubungan (a) Amplitudo ratio dengan Frequency ratio, (b) Phase angle dengan Frequency ratio.....	15
<b>Gambar 2. 13</b> (a) meshing dengan 294 elemen dan 344 node (b) meshing dengan 1008 elemen dan 1096 node (Shigley, 2011) .....	17
<b>Gambar 2. 14</b> Sasis Battery box standar .....	17
<b>Gambar 2. 15</b> Cloud chart equivalent stress .....	18
<b>Gambar 2. 16</b> cloud chart total deformation.....	18
<b>Gambar 2. 17</b> 3D diagram dari battery box.....	19
<b>Gambar 2. 18</b> (a) Daerah stress diagram battery box Ketika pengereman mendadak (b) deformasi dan perpindahan battery box Ketika pengereman mendadak .....	19
<b>Gambar 2. 19</b> (a) Daerah stress diagram pada battery box saat berbelok tajam (b) Deformasi dan perpindahan pada battery box saat berbelok tajam .....	20
<b>Gambar 2. 20</b> (a) Modal Shape 1 (b) Modal shape 3 (c) Modal shape 5 (d) Modal shape 7 .....	21
<b>Gambar 2. 21</b> Stress dan Deformation pada box battery pack.....	22
<b>Gambar 2. 22</b> Vibration Deformation Cloud (a) First order mode (b) second order mode (c) third order mode (d) fourth order mode .....	23
<b>Gambar 2. 23</b> Grafik waktu perpindahan dari simpul tengah penutup atas battery box .....	24
<b>Gambar 2. 24</b> (a) Geometri Battery Pack. (b) Mesh pada Battery Pack .....	25
<b>Gambar 2. 25</b> (a) stress dari kondisi kerja 1 (b) deformasi pada kondisi kerja 1 .....	26
<b>Gambar 2. 26</b> (a) stress dari kondisi kerja 2. (b) deformasi pada kondisi kerja 2.....	26
<b>Gambar 2. 27</b> (a) stress pada kondisi kerja 3. (b) deformasi pada kondisi kerja 3.....	27
<b>Gambar 3. 1</b> Diagram Alir Pengujian.....	28
<b>Gambar 3. 2</b> model battery pack yang diadopsi dalam desain.(i.d.aliexpress.com).....	29
<b>Gambar 3. 3</b> Posisi Peletakan pada battery pack.(kumparan.com) .....	30
<b>Gambar 3. 4</b> Model penuh dinamis kendaraan untuk E-Scooter .....	32
<b>Gambar 3. 5</b> FBD ditinjau dari roda depan .....	32
<b>Gambar 3. 6</b> FBD ditinjau bodi E-Scooter .....	33
<b>Gambar 3. 7</b> FBD ditinjau dari roda belakang E-Scooter.....	33
<b>Gambar 3. 8</b> FBD ditinjau dari swingarm E-Scooter .....	34
<b>Gambar 3. 9</b> Model Geometri Battery Pack (a) model penuh battery pack (b) model battery pack setelah dihilangkan Sebagian (c) Battery Module .....	35
<b>Gambar 3. 10</b> Proses import geometri battery pack pada ANSYS .....	36
<b>Gambar 3. 11</b> Tampilan geometri battery pack pada aplikasi ANSYS.....	37

<b>Gambar 3. 12</b> Tampak meshing pada battery pack (a) tampak isometri mesh pada battery pack (b) tampak samping mesh pada battery pack .....	38
<b>Gambar 3. 13</b> orthogonal quality dan skewness mesh metric spectrum .....	38
<b>Gambar 3. 14</b> grafik perbandingan antara nilai stress dengan ukuran dari mesh.....	39
<b>Gambar 3. 15</b> diagram batang dari meshing quality dari geometri battery pack (a) element metrics Orthogonal quality (b) element metrics skewness .....	40
<b>Gambar 3. 16</b> tahap processing menggunakan ANSYS R2 2020.....	40
<b>Gambar 3. 17</b> Diagram alir pada Analisa static structural.....	41
<b>Gambar 3. 18</b> Free body diagram pada beban statis.....	42
<b>Gambar 3. 19</b> gaya battery pack searah sumbu Y negative .....	42
<b>Gambar 3. 20</b> fix support pada battery pack .....	43
<b>Gambar 3. 21</b> Analisa Setting pada Modal Analysis.....	43
<b>Gambar 3. 22</b> Diagram alir pada pengujian dinamis .....	44
<b>Gambar 3. 23</b> Analysis Setting pada Hamonic response.....	45
<b>Gambar 3. 24</b> Setup Boundary Condition yang digunakan dalam pengujian dinamis (a) Harmonic response bumpy and sharp turn (b) Harmonic response Bumpy and sharp acceleration (c) Harmonic response bump acceleration and deceleration for turning .....	46
<b>Gambar 3. 25</b> Kondisi Kerja pemberian percepatan pada pengujian dinamis .....	47
<b>Gambar 4. 1</b> Hasil uji static structural casing battery pack material structural steel (a) Equivalent Stress (b) Total Deformasi .....	49
<b>Gambar 4. 2</b> Hasil uji static structural casing battery pack material alluminium alloy (a) Equivalent Stress (b) Total Deformation.....	50
<b>Gambar 4. 3</b> Grafik perbandingan Stress Material Structural Steel dan Alluminium Alloy.....	50
<b>Gambar 4. 4</b> Grafik Perbandingan Total Deformation Material Structural Steel dan Alluminium Alloy .....	51
<b>Gambar 4. 5</b> Mode Shape pertama pada material Structural Steel .....	53
<b>Gambar 4. 6</b> Mode Shape pertama material alluminium alloy .....	54
<b>Gambar 4. 7</b> Equivalent Stress casing battery pack dengan material Structural steel pada kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam.....	55
<b>Gambar 4. 8</b> Equivalent stress casing battery pack dengan material Alluminium Alloy pada kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. ....	55
<b>Gambar 4. 9</b> Grafik perbandingan stress casing battery pack material structural steel dan alluminium alloy pada sumbu x pada kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. ....	56
<b>Gambar 4. 10</b> Directional deformation pada kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam dengan material structural steel dilihat dari sumbu (a) x (b) y (c) z. ....	58
<b>Gambar 4. 11</b> Directional deformation casing battery pack dengan material alluminium alloy pada kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam pada sumbu (a) x (b) y (c) z. ....	60
<b>Gambar 4. 12</b> grafik perbandingan directional deformation pada sumbu x, y, dan z pada casing battery pack dengan menggunakan material structural steel dan alluminium alloy pada kondisi 1. ....	62
<b>Gambar 4. 13</b> Grafik perbandingan material di kondisi 1 .....	63
<b>Gambar 4. 14</b> Equivalent Stress casing battery pack dengan material structural steel pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat. ....	64
<b>Gambar 4. 15</b> Equivalent Stress casing battery pack dengan material alluminium alloy pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat. ....	64
<b>Gambar 4. 16</b> Grafik perbandingan stress casing battery pack material structural steel dan alluminium alloy pada sumbu x pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat. ....	65

<b>Gambar 4. 17</b> Directional deformation casing battery pack dengan material structural steel pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat pada sumbu (a) x (b) y (c) z. ....	67
<b>Gambar 4. 18</b> Directional deformation casing battery pack dengan material aluminium alloy pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat pada sumbu (a) x (b) y (c) z. ....	69
<b>Gambar 4. 19</b> grafik perbandingan directional deformation pada sumbu x, y, dan z pada casing battery pack dengan menggunakan material structural steel dan aluminium alloy pada kondisi 2. ....	71
<b>Gambar 4. 20</b> Grafik perbandingan material di kondisi 2 .....	72
<b>Gambar 4. 21</b> Equivalent stress casing battery pack dengan material structural steel pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok.....	73
<b>Gambar 4. 22</b> Equivalent stress casing battery pack dengan material Aluminium Alloy pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok. ....	73
<b>Gambar 4. 23</b> Grafik perbandingan stress casing battery pack material structural steel dan aluminium alloy pada sumbu x pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi, dan berbelok. ....	74
<b>Gambar 4. 24</b> Directional deformation casing battery pack dengan material structural steel pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok pada sumbu (a) x (b) y (c) z. ....	76
<b>Gambar 4. 25</b> Directional deformation casing battery pack dengan material aluminium alloy pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok pada sumbu (a) x (b) y (c) z.....	78
<b>Gambar 4. 26</b> grafik perbandingan directional deformation pada sumbu x, y, dan z pada casing battery pack dengan menggunakan material structural steel dan aluminium alloy pada kondisi 3. ....	80
<b>Gambar 4. 27</b> Grafik Perbandingan material di kondisi 3 .....	81

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> perbandingan karakteristik baterai (Fauzan, 2019) .....	4
<b>Tabel 2. 2</b> Karakteristik Parameter dari Aluminium alloy .....	17
<b>Tabel 2. 3</b> Tabel Properti Dari Material Alluminium Alloy .....	25
<b>Tabel 2. 4</b> Tabel parameter atau kondisi kerja pada battery pack .....	26
<b>Tabel 3. 1</b> Data Material Structural Steel .....	30
<b>Tabel 3. 2</b> Data Material Alluminium Alloy .....	31
<b>Tabel 3. 3</b> Dimensi dari Battery Pack .....	35
<b>Tabel 3. 4</b> Tabel konvergensi meshing .....	39
<b>Tabel 4. 1</b> Frekuensi Mode shape material structural steel .....	52
<b>Tabel 4. 2</b> Frekuensi Mode Shape material alluminium alloy .....	53

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Saat ini perkembangan kendaraan listrik di Indonesia berkembang sangat pesat. Dari data yang dihimpun Kementerian Perhubungan (Kemenhub) mencatat jumlah kendaraan listrik di Indonesia sejumlah 14.400 unit pada pertengahan Nopember 2021. Dengan rincian kendaraan listrik itu terdiri dari 1.656 mobil penumpang, 262 kendaraan roda tiga, 12.464 sepeda motor listrik, 13 bus, dan 5 mobil barang. Dari rincian data kendaraan listrik diatas, terlihat didominasi oleh kendaraan sepeda motor listrik. Dari data tersebut banyak instansi di Indonesia melakukan pengembangan kendaraan listrik roda dua, salah satunya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui PUI SKO telah berhasil melahirkan berbagai produk kendaraan berbasis listrik salah satunya adalah sepeda motor listrik Gesits yang telah berhasil menjajal pasar otomotif Indonesia.

Hal ini membuat Departemen Teknik Mesin ITS melakukan penelitian tentang kendaraan elektrik roda dua. Dimana pada laboratorium Rekayasa Vibrasi dan Sistem Otomotif juga meneliti dan mengembangkan *electric scooter*. *Electric scooter* ini menggunakan sumber energi dari baterai. Komponen baterai kendaraan listrik ini terdiri dari *Battery cell*, *Battery module* dan *Battery pack*. *Battery cell* adalah unit dasar baterai lithium ion yang menggunakan energi listrik dengan pengisian dan pengosongan. Dibuat dengan memasukkan katoda, anoda, *separator* dan elektrolit ke dalam *aluminium case*. *Battery Module* adalah gabungan baterai yang dimasukkan ke dalam *frame* dengan menggabungkan sejumlah sel untuk melindungi sel dari guncangan eksternal, panas atau getaran. *Battery Pack* adalah bentuk akhir dari sistem baterai yang dipasang pada kendaraan listrik.

Baterai sebagai salah satu komponen utama dalam kendaraan listrik tentunya mengalami banyak perkembangan seiring dengan semakin bertambahnya produksi kendaraan listrik. *Battery pack* selain sebagai tempat untuk menaruh komponen baterai juga berfungsi sebagai pelindung komponen baterai kendaraan listrik. Desain *battery pack* yang tidak memadai akan menyebabkan banyak masalah seperti keretakan, kebisingan atau kerusakan baterai. Akibatnya, analisis struktural dari *casing battery pack* telah menjadi salah satu perhatian utama dalam rekayasa kendaraan listrik. Misalnya menghitung frekuensi modal berdasarkan *Finite Element Analysis* (FEA) untuk mempelajari respon dinamis dari bagian bagian *battery pack*. Perlu dicatat bahwa hampir semua penelitian tentang analisis struktural berfokus pada karakteristik getarannya. Performa dinamis komponen kendaraan memang sangat penting untuk mencerminkan kemampuan ketahanan getarannya saat kendaraan listrik melaju di berbagai jalan.

Pada penelitian kali ini memiliki tujuan untuk mencari kekuatan pada *casing battery pack* dengan mencari total deformasi dan nilai *stress* pada pengujian statis dan mencari resonansi pada eksitasi sistem yang diberikan pada pengujian dinamis. Untuk memenuhi persyaratan desain struktur, perakitan *casing battery pack* harus sebaik mungkin untuk pertimbangan penghematan energi dan perpanjangan jarak tempuh. Hal tersebut bisa ditanggulangi dengan memberikan variasi material pada *casing battery pack*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka perlu diadakan penelitian mengenai *battery pack* pada *E-scooter*. Dalam penelitian tugas akhir ini terdapat beberapa rumusan masalah, antara lain:

1. Bagaimana deformasi dan tegangan yang terjadi pada desain *casing battery pack* pada saat diberi beban statis
2. Bagaimana deformasi dan tegangan yang terjadi pada desain *casing battery pack* pada saat diberi beban dinamis
3. Apa jenis material yang cocok dengan desain dari *casing battery pack*

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan diadakan penelitian ini adalah untuk :

1. Mengetahui deformasi dan tegangan yang terjadi pada desain *casing battery pack* pada saat diberi beban statis
2. Mengetahui deformasi dan tegangan yang terjadi pada desain *casing battery pack* pada saat diberi beban dinamis
3. Mengetahui material yang cocok dengan desain dari *casing battery pack*

### **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penulisan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Beban statis yang digunakan merupakan beban maksimum *battery module* ditambah dengan *battery cell*.
2. Pengujian dinamis menggunakan standar yang ada di jurnal.
3. Parameter yang digunakan berdasarkan jurnal.
4. Pemodelan 3D dari desain *battery pack* dibuat dengan *software solidworks 2021*.
5. Perangkat lunak yang digunakan adalah *ANSYS Workbench R2 2020*.
6. Bagian yang dianalisis hanya *casing* pada *battery pack*.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Hasil yang diperoleh dari penelitian kali ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan informasi mengenai kekuatan dan respon vibrasi pada desain *battery pack* yang bisa digunakan sebagai rujukan pengembangan kendaraan skuter listrik
2. Sebagai referensi dan literatur untuk penelitian mengenai *battery pack*
3. Mengetahui karakteristik desain *battery pack*



## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Kendaraan listrik

Kendaraan listrik atau disebut juga *electric vehicle* menggunakan tenaga dari motor listrik yang memperoleh energi dari sumber listrik. Baterai memainkan peran penting dalam evolusi kendaraan listrik karena kendaraan listrik harus membawa barang portabel yang menyimpan listrik agar dapat mengalirkan listrik ke motornya. Baterai menyimpan energi listrik yang fungsinya sama dengan tangki bahan bakar pada mesin pembakaran dalam. Penggunaan kendaraan listrik tentunya dapat mendatangkan beberapa manfaat bagi masyarakat umat manusia. Salah satu yang paling jelas keuntungan bahwa orang yang menggunakan kendaraan listrik adalah pengurangan dari emisi gas rumah kaca, kendaraan listrik yang bertenaga terutama oleh motor listrik tidak memerlukan pembakaran untuk menjalankan kendaraan seperti kendaraan mesin pembakaran internal. Tanpa pembakaran, tidak ada emisi gas rumah kaca dengan kendaraan listrik.

Namun ada juga kerugian menggunakan kendaraan listrik daripada menggunakan kendaraan bermesin pembakaran dalam. Kelemahan dari menggunakan kendaraan listrik termasuk waktu yang dibutuhkan untuk baterai kendaraan listrik diisi ulang, dengan menggunakan kendaraan listrik, pengguna harus mengisi kendaraan dengan tepat seperti bagaimana pengguna mesin pembakaran internal perlu mengisi ulang bahan bakar. Tidak seperti mengisi bahan bakar, waktu yang dibutuhkan untuk mengisi ulang di kendaraan listrik lebih lama, sesi pengisian ulang baterai yang memakan waktu bisa jadi cukup tidak nyaman bagi pengguna kendaraan listrik

### 2.2 Baterai

Baterai memainkan peran penting dalam evolusi kendaraan listrik karena kendaraan listrik harus membawa barang portabel yang menyimpan listrik agar dapat mengalirkan listrik ke motornya. Baterai menyimpan energi listrik yang fungsinya sama dengan tangki bahan bakar pada mesin pembakaran dalam. Ada beberapa macam baterai yang digunakan untuk saat ini yaitu *nickel metal hydride* (NiMH), *Lithium-ion* (Li-ion), *Nickel cadmium* (NiCD), dan *Lead acid battery*. Karakteristik dari baterai meliputi tenaga, kemampuan penyimpanan energi atau kapasitas energi, spesifik energi, densitas energi, dan densitas tenaga dari baterai. Kapasitas energi adalah besarnya tenaga yang dapat dihasilkan baterai selama waktu tertentu yang dinyatakan dengan satuan *watt hour* (Wh), kapasitas energi sebesar 1 Wh artinya jika baterai digunakan untuk menghasilkan tenaga sebesar 1 *watt* maka akan habis dalam 1 jam, tenaga spesifik yaitu tenaga per berat (W/kg), dan spesifik energi adalah energi per berat (Wh/kg). (Fauzan, 2019)

**Tabel 2. 1** perbandingan karakteristik baterai (Fauzan, 2019)

Battery type	Specific Energy (Wh/kg)	Energy Density (Wh/L)	Specific Power (W/kg)	Mass of battery for EV to run a 100 km with 20 kWh/100km	Mass reduction compared to previous battery
Lead - Acid	35-40	80-90	285	500 – 600 kg	0 %
Ni- MH	50-70	100-140	200	300 – 400 kg	36.36 %
ZEBRA (Na-NiCl <sub>2</sub> )	100	160	170	200 kg	42.86 %
Li-ion	150-200	250-400	260	100 – 140 kg	40 %

Data dan spesifikasi masing-masing jenis baterai diringkas dan ditabulasi dalam tabel 2.1. Tabel 2.1 menunjukkan bahwa energi spesifik dan densitas jenis baterai Li-ion lebih besar dibandingkan dengan yang lain. Ini berarti kendaraan listrik yang ditenagai oleh baterai Li-ion lebih ringan dalam massa *battery pack* menempati ruang volume yang relatif kecil. Baterai Li-ion sudah menjadi teknologi yang sangat matang dalam menggerakkan kendaraan listrik di masa sekarang.

### 2.3 Battery Pack

Menurut SAE J2464:2009 *battery pack* adalah modul yang saling berhubungan termasuk semua subsistem tambahan untuk dukungan mekanis, manajemen termal, dan kontrol elektronik. Di mana modul sendiri adalah kumpulan sel yang saling berhubungan secara seri dan / atau paralel menjadi kesatuan. Komponen *battery pack* terdiri dari beberapa bagian yaitu *battery cell*, *connector*, *module*, *holder*, dan *casing*.

#### 2.3.1 Battery Cell

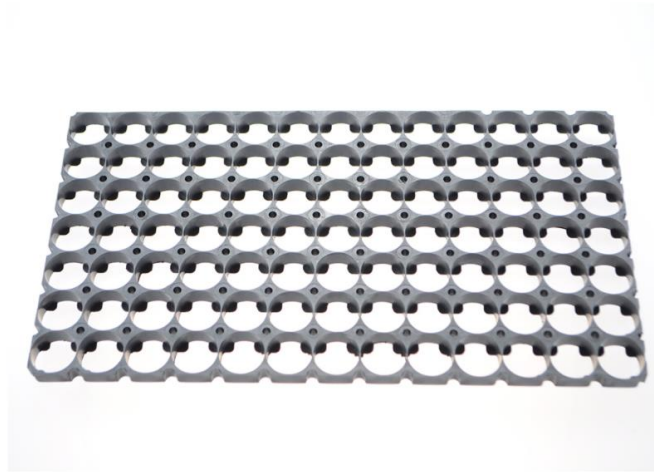
*Battery cell* adalah unit dasar baterai *lithium ion* yang menggunakan energi listrik dengan pengisian dan pengosongan. Dibuat dengan memasukkan katoda, anoda, *separator* dan elektrolit ke dalam *aluminium case*.



**Gambar 2. 1** *Battery cell*

#### 2.3.2 Holder

Sebagai struktur inti untuk sebagian besar baterai Li-ion ada struktur kaku yang disebut *holder*. *Holder* ini adalah bagian yang memiliki tujuan untuk mengatur posisi semua sel. Tidak hanya untuk proses pengelasan, tetapi juga ketika penggunaan baterai di dalam kendaraan.



**Gambar 2. 2** *Holder* Baterai

### 2.3.3 Connector

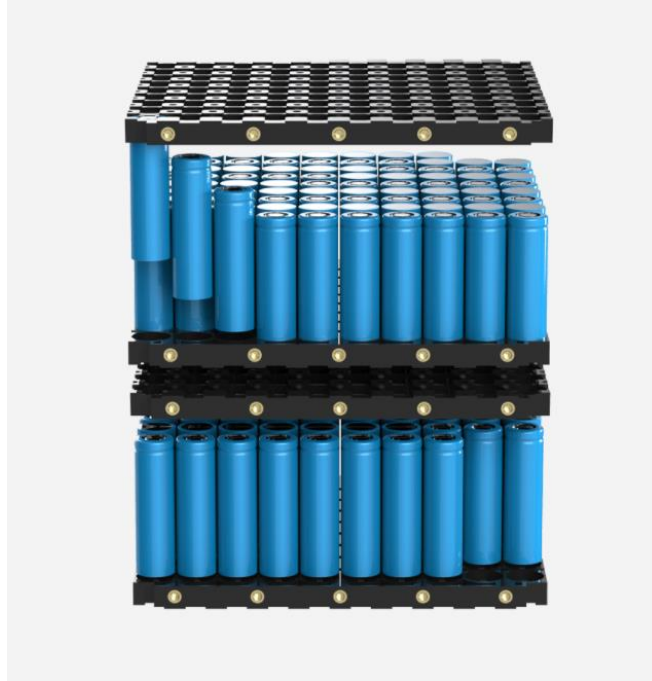
Sebagai *connector*, para insinyur memutuskan untuk membuat *connector* nikel-tembaga. Penggunaan strip nikel ketebalan 0,1 mm standar dengan ketebalan plat tembaga yang dapat disesuaikan, dalam hal ini 1,5 mm. Strip nikel yang disolder dengan plat tembaga dapat menahan arus dan suhu tinggi hingga 200° C. Dalam kondisi standar, suhu semacam ini tidak mungkin dicapai dalam baterai Li-ion.



**Gambar 2. 3** *Connector* dengan nikel tembaga

### 2.3.4 Battery Module

*Battery Module* adalah gabungan baterai yang dimasukkan ke dalam *frame* dengan menggabungkan sejumlah sel dengan memakai holder dan di *welding* dengan *nickel strips* sebagai *connector* untuk melindungi sel dari guncangan eksternal, panas atau getaran.



**Gambar 2. 4** *Battery Module*

### **2.3.5** *Casing*

*Casing* berfungsi untuk menopang berat dari battery pack dan melindungi dari kerusakan. *Casing* yang kuat untuk baterai Li-ion wajib dimiliki pada *E-Scooter*. Setiap kegagalan kasus dapat menyebabkan kerusakan pada *E-Scooter* dan bahkan berefek pada ledakan.

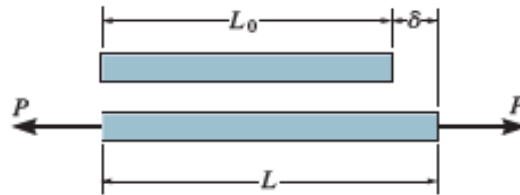


**Gambar 2. 5** *Casing battery pack*

## **2.4** *Konsep regangan*

Regangan atau *strain* dilambangkan dengan  $\epsilon$ . Regangan pada suatu benda terjadi jika benda tersebut mengalami perubahan panjang akibat diberikan beban secara aksial. Sama halnya dengan tegangan, regangan juga mengalami tekanan dan tarikan. Pada gambar 2.6

regangan ( $\varepsilon$ ) didapat dengan membagi perpanjangan yang terjadi ( $\delta$ ) dengan panjang mula-mula ( $L_0$ ) dari suatu specimen. Rumus regangan adalah :



**Gambar 2. 6** Perubahan bentuk karena beban Tarik (*Russel Hibbeler,2017*)

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.1)$$

Dimana

$\varepsilon$  = Regangan

$L_0$  = Panjang mula-mula ( $m^2$ )

$L_1$  = Panjang akhir ( $m^2$ )

$\delta$  = Perubahan Panjang ( $m^2$ )

## 2.5 Konsep tegangan

Secara sederhana tegangan dapat didefinisikan sebagai besaran gaya yang bekerja pada satuan luas permukaan benda yang dikenai gaya. Terdapat dua jenis tegangan yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal adalah tegangan yang bekerja secara tegak lurus pada permukaan benda ( $\sigma$ ).

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (2.2)$$

Tegangan geser adalah tegangan yang bekerja sejajar dengan permukaan benda ( $\tau$ ).

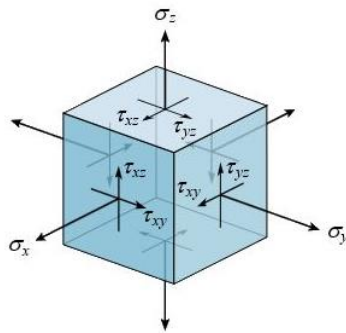
$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \quad (2.3)$$

$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \quad (2.4)$$

Dimana:  $P$  = Gaya (N)

$A$  = Luas permukaan yang dikenai gaya ( $m^2$ )

Gambar 2.7 menunjukkan komponen tegangan menurut koordinat x,y,x.



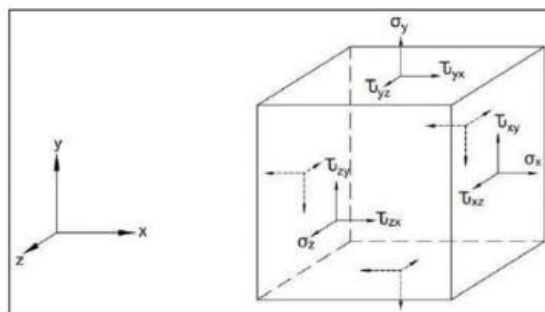
**Gambar 2. 7** komponen tegangan (*Russel Hibbeler, 2017*)

Tegangan biasanya terjadi pada konstruksi, seperti pada sambungan keeling, gunting dan sambungan baut. Dalam aplikasinya tegangan geser dapat dibedakan berdasarkan jenis gaya yang bekerja pada elemen yaitu :

1. Tegangan geser langsung
2. Tegangan geser putir

### 2.5.1 Tegangan *Von Mises*

Metode elemen hingga adalah salah satu metode untuk mendapatkan tegangan-tegangan yang terjadi pada setiap sisi untuk suatu elemen tiga dimensi. Cara untuk mengetahui acuan nilai tegangan maksimum yang terjadi pada *node* tertentu terhadap tegangan izin (*allowable stress*) atau tegangan lelehnya (*yield strength*) untuk menyelesaikan metode elemen hingga dalam menghitung seluruh komponen tegangan yang terjadi adalah menggunakan prinsip tegangan *von mises*. *Von mises stress* atau tegangan uniaksial (*uniaxial stress*) adalah tegangan yang mengombinasikan tegangan-tegangan utama (normal dan geser) pada suatu elemen dan tidak memiliki arah.



**Gambar 2. 8** komponen tegangan dalam 3D

Gambar 2.8 menunjukkan komponen tegangan yang mungkin ada dalam sebuah benda 3 dimensi. *Von mises stress* adalah pengembangan dari teori energi distorsi dimana energi distorsi merupakan energi yang dibutuhkan oleh suatu material untuk mengalami deformasi bentuk. Jika suatu material terjadi distorsi akibat beban luar maka bentuk materialnya akan berubah tanpa mengubah volumenya. Tegangan *von mises* mengalkulasikan tegangan ekuivalen yang mengakibatkan deformasi bentuk yang terjadi.

Jika struktur memiliki tegangan atau energi distorsi *von mises* lebih besar dari tegangan atau energi distorsi yang diizinkan atau dibutuhkan untuk mencapai kondisi leleh (*yield*

strength) maka struktur tersebut mengalami kegagalan. Tegangan *von mises* dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini dengan satuannya berupa Pa atau N/m<sup>2</sup>.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2.5)$$

Dimana :

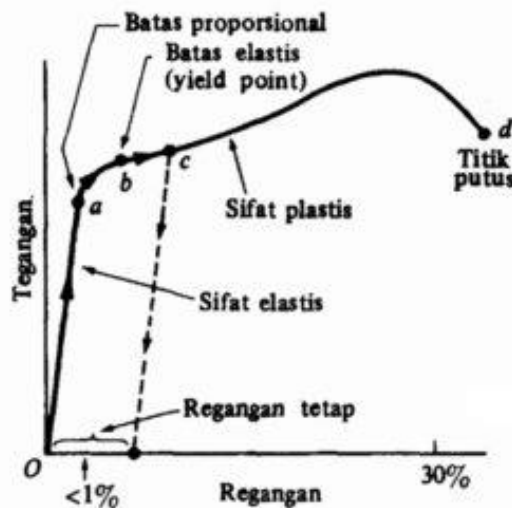
- $\sigma_{eq}$  = Tegangan Ekuivalen *Von Mises* (Pa)
- $\sigma_x$  = Tegangan Normal Sumbu X (Pa)
- $\sigma_y$  = Tegangan Normal Sumbu Y (Pa)
- $\sigma_z$  = Tegangan Normal Sumbu Z (Pa)
- $\tau_{xy}$  = Tegangan Geser Bidang XY (Pa)
- $\tau_{xz}$  = Tegangan Geser Bidang XZ (Pa)
- $\tau_{zy}$  = Tegangan Geser Bidang YZ (Pa)

## 2.6 Hubungan tegangan dan regangan

Tegangan dan regangan memiliki hubungan berupa rasio antara keduanya disebut modulus young atau modulus elastisic merupakan tangen dari sudut yang terbentuk antara garis hubungan tegangan dan regangan dengan garis sumbu regangan dan dinotasikan :

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.6)$$

- Dimana  $E$  = modulus elastisitas ( kg/m.s<sup>2</sup>)
- $\theta$  = Sudut antar garis hubungan regangan dan garis sumbu tegangan



**Gambar 2. 9** kurva tegangan dan regangan pada material

## 2.7 Safety factor

Faktor keamanan (*safety factor*) adalah faktor yang digunakan untuk mengevaluasi agar perencanaan elemen mesin terjamin keamanannya dengan dimensi yang minimum. Berikut merupakan rumus untuk mendapatkan nilai *safety factor*.

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_e} \quad (2.7)$$

Dimana :  $\eta$  = Faktor keamanan

$S_y$  = Tegangan luluh material (Mpa)

$\sigma_e$  = Tegangan *von mises* maksimum (Mpa)

Dalam perhitungan nilai kegagalan ini dikemukakan oleh *von mises* tahun 1913 yang menyatakan akan terjadi luluh pada benda jika tegangan yang diterima benda tersebut melampaui kekuatan luluh (budarma,2016) oleh karena itu dalam mendesain *battery pack* tegangan *von mises* harus lebih kecil dari tegangan luluh material agar desain yang dibuat aman untuk digunakan.

## 2.8 Getaran

Setiap gerakan yang berulang setelah selang waktu tertentu disebut getaran atau osilasi ayunan pendulum dan gerakan tali yang dipetik adalah contoh tipikal dari getaran (rao, 2010). Gerakan berulang teratur dan terjadi pada frekuensi yang relatif rendah, biasanya disebut osilasi, sedangkan setiap gerakannya berulang bahkan pada frekuensi yang tinggi, dengan amplitude rendah, dan memiliki perilaku yang tidak teratur biasa disebut getaran. Getaran juga didefinisikan sebagai gerakan bolak balik di sekitar kesetimbangan. Kesetimbangan merupakan suatu keadaan dimana suatu benda dalam keadaan diam jika tidak ada gaya yang bekerja pada benda tersebut.

Getaran juga terbagi menjadi dua berdasarkan penyebabnya, yaitu getaran bebas (*free vibration*) dan getaran paksa (*force vibration*). Getaran bebas terjadi jika suatu sistem setelah gangguan awal dibiarkan bergetar dengan sendirinya, maka getaran berikutnya dikenal sebagai getaran bebas. Tidak ada gaya eksternal yang bekerja pada sistem. Itu osilasi pendulum sederhana adalah contoh getaran bebas. Sedangkan getaran paksa terjadi jika suatu sistem mengalami gaya eksternal (seringkali tipe berulang), getaran yang dihasilkan dikenal sebagai getaran paksa, osilasi yang muncul di mesin seperti mesin diesel adalah contoh getaran paksa. Jika frekuensi gaya eksternal bertepatan dengan salah satu frekuensi alami sistem, kondisi yang dikenal sebagai resonansi terjadi, dan sistem mengalami bahaya osilasi besar. Kegagalan struktur seperti Gedung, jembatan, turbin, dan sayap pesawat terbang telah dikaitkan dengan terjadinya resonansi (rao, 2010). Pada penelitian yang ini menggunakan teori mekanika getaran sebagai landasan dan literatur. Adapun subbab yang akan dibahas antara lain *Multi Degree of Freedom, Base excitation, dan Harmonic Vibration*.

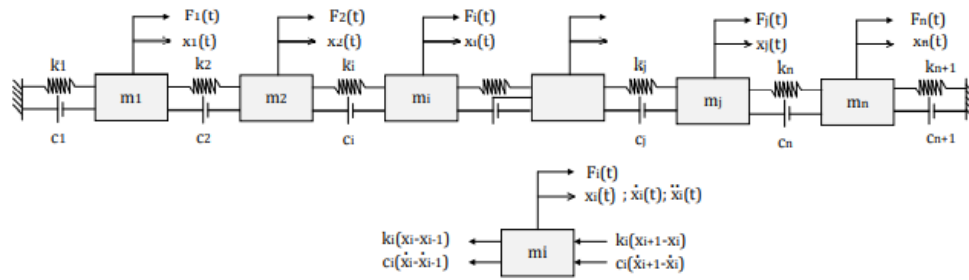
### 2.8.1 Multi degree of Freedom Vibration

Derajat kebebasan atau disebut juga dengan nama *degree of freedom* adalah jumlah koordinat minimum yang diperlukan untuk menggambarkan gerakan suatu sistem. Selain digunakan untuk menggambarkan gerakan sistem *degree of freedom* juga diperlukan untuk menentukan posisi dari suatu bagian sistem yang akan dianalisa. Dalam bidang *engineering*, hampir keseluruhan sistem memiliki lebih dari satu *degree of freedom*, sehingga dapat disebut dengan sistem *multi degree of freedom*.

Persamaan gerak untuk MDOF secara umum diturunkan dari hukum newton II. Karena sistem MDOF memiliki penyelesaian yang kompleks, maka digunakan matriks untuk



merepresentasikan sistem MDOF. Secara sederhana, sistem MDOF dapat dimodelkan melalui sistem massa pegas yang ditarik oleh gaya  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$ ,  $F_3(t)$  (Wiwiek, 2010). Pada gambar 2.10



**Gambar 2. 10** sistem dinamis *multi degree of freedom* (Wiwiek, 2010)

Penurunan persamaan dengan metode Hukum Newton II dari FBD diatas adalah :

$$m_i \ddot{x}_i = -k_i (x_i - x_{i-1}) + k_{i+1} (x_{i+1} - x_i) - c_i (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + c_{i+1} (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + F_i \quad (2.8)$$

Persamaan gerak dari masing masing massa yang ditinjau adalah sebagai berikut :

$$m_i \ddot{x}_i - c_i \dot{x}_{i-1} + (c_i + c_{i+1}) \dot{x}_i - c_{i+1} \dot{x}_{i+1} - k_i x_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) x_i - k_{i+1} x_{i+1} = F_i \quad (2.9)$$

Dimana :  $i = 2,3,4, \dots, (n-1)$

Untuk persamaan gerak massa  $M_1$  dan  $M_n$  adalah :

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = F_1 \quad (2.10)$$

$$m_n \ddot{x}_n - c_n \dot{x}_{n-1} + (c_n + c_{n+1}) \dot{x}_n - k_n x_{n-1} + (k_n + k_{n+1}) x_n = F_n \quad (2.11)$$

Persamaan 2.10 hingga 2.11 dapat digambarkan sebagai matrix sebagai berikut :

$$[m] \ddot{\vec{x}} + [c] \dot{\vec{x}} + [k] \vec{x} = \vec{F} \quad (2.12)$$

Dimana  $[m]$ ,  $[k]$ , dan  $[c]$  adalah massa kekakuan dan damping matrix, sebagai berikut :

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & m_n \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & (c_3 + c_4) & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -c_n & (c_n + c_{n+1}) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_n & (k_n + k_{n+1}) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

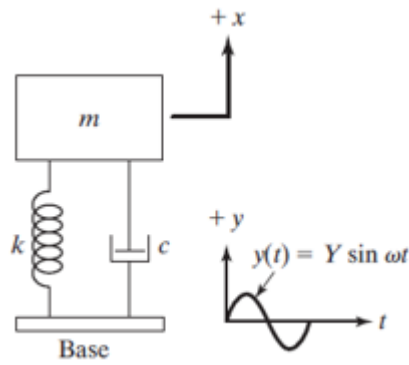
$x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$ , dan  $\vec{F}$  adalah perpindahan, kecepatan, percepatan, dan vector gaya, sebagai berikut:

$$\vec{x} = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n(t) \end{Bmatrix}, \quad \dot{\vec{x}} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \dot{x}_n(t) \end{Bmatrix}, \quad \ddot{\vec{x}} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \ddot{x}_n(t) \end{Bmatrix}, \quad \vec{F} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n(t) \end{Bmatrix} \quad (2.16)$$

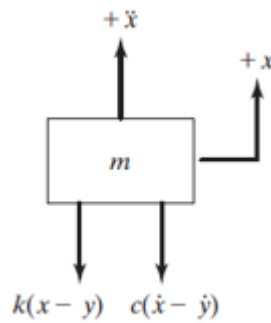
### 2.8.2 Base Motion Vibration

*Base motion vibration* ini adalah getaran pada *base* sistem utama yang bergerak secara harmonis dimana mempengaruhi massa peredam di atasnya. Gerakan harmonis adalah gerakan berulang sehingga dapat merubah posisi massa peredam dan pegas juga akan memiliki perpanjangan tertentu. Gambar 2.11 (a) merupakan skema sistem dinamis *base motion vibration*, sedangkan gambar 2.11 (b) menunjukkan *free body diagram* dari sistem (a).

Gambar tersebut menunjukkan gerakan harmonis dari suatu sistem dengan  $y(t)$  merupakan simpangan dari *base* dan  $x(t)$  adalah simpangan dari massa pada *posisi static equilibrium* saat waktu  $t$ . Maka total simpangan dari pegas dan kecepatan relatif dari *dampers* adalah  $\dot{x} - \dot{y}$ .



(a) Base excitation



(b) Base Excitation Free Body Diagram

**Gambar 2. 11** (a) Base Excitation (b) Base Excitation Free Body Diagram

Dari gambar diatas diperoleh persamaan gerak sebagai berikut :

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.17)$$

Jika  $y(t) = Y \sin \omega t$  maka persamaan (2.17) menjadi :

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= c\dot{y} + ky \\ &= kY \sin \omega t + c\omega Y \cos \omega t \\ &= A \sin (\omega t - \alpha) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Dimana  $= Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}$  dan  $\alpha = \tan^{-1}\left[-\frac{(c\omega)}{k}\right]$  maka didapatkan respon dari massa

$$\begin{aligned} x_p(t) &= \frac{Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{((k - (m\omega)^2)^2 + m\omega^2)}} \sin (\omega t - \phi_1 - \alpha) \\ \phi_1 &= \tan^{-1}\left(\frac{c\omega}{k - m\omega^2}\right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Dimana menggunakan identitas trigonometri persamaan dapat ditulis sebagai berikut :

Dengan

$$x_p(t) = X \sin (\omega t - \phi) \quad (2.20)$$

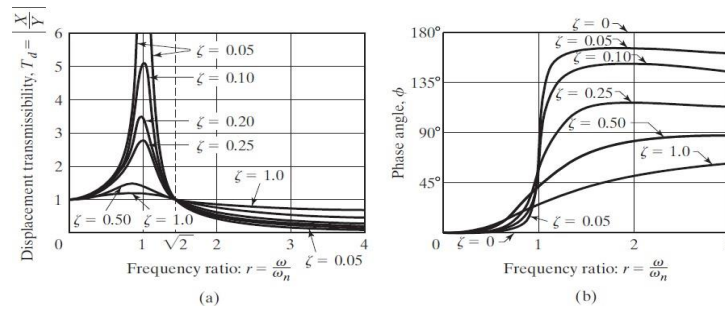
Dimana nilai  $X$  dan  $\phi_1$  didapat dari

$$\frac{X}{Y} = \frac{\sqrt{k^2+(c\omega)^2}}{((k-(m\omega)^2)^2+m\omega^2)} \quad (2.21)$$

Dan

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{m c \omega^3}{k(k-m\omega^2)+c\omega^2} \quad (2.21)$$

Sedangkan  $\frac{X}{Y}$  merupakan *displacement transminility*



**Gambar 2. 12** Grafik hubungan (a) Amplitudo *ratio* dengan *Frequency ratio*, (b) *Phase angle* dengan *Frequency ratio*

Gambar 2.12 diatas merupakan grafik hubungan *displacement transminility* dan sudut fase dengan rasio frekuensi pada sistem *base motion vibration*.

## 2.9 Finite Element Method (FEM)

*Finite element Method* atau Metode Elemen Hingga adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi permasalahan diferensial baik persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*) maupun persamaan diferensial biasa (*Partial Differential Equation*). Karena persamaan diferensial sering kali digunakan sebagai model permasalahan keteknikan maka penting bagi para insinyur untuk dapat memahami dan mampu menerapkan MEH. Saat ini MEH merupakan salah satu metode numerik paling *versatile* untuk memecahkan permasalahan dalam domain kontinum.

*Finite Element Method (FEM)*, atau *Finite Element Analysis (FEA)*, didasarkan pada gagasan membagi benda rumit menjadi potongan kecil dan mudah diatur. Penerapan ide sederhana ini bisa ditemukan dimana-mana dalam kehidupan sehari-hari, begitu juga di bidang Teknik. (Liu, 2003).

Metode elemen hingga dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak keteknikan. Perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini adalah *ANSYS Workbench 2020 R2*. Tahapan penggunaan metode elemen hingga pada *ANSYS* adalah sebagai berikut

1. Mendeskripsikan masalah

Mendeskripsikan masalah dilakukan untuk penentuan jenis tipe simulasi yang digunakan seperti Analisa struktur, perpindahan panas, dinamis, dan lainnya.

2. Pembuatan Geometri

Dalam menganalisa dengan metode elemen hingga dibutuhkan geometri (obyek), material, dan menerapkan kondisi batas yang dilakukan.

3. Mendefinisikan material

Berbagai jenis material sudah tersedia pada *ANSYS Workbench 2020 R2*. Pengguna juga dapat menambahkan material yang didefinisikan sendiri. Pengguna dapat memasukkan material lebih dari satu bergantung pada kebutuhan pengguna.

4. *Generate Mesh*

*Generate mesh* pada *ANSYS* berfungsi untuk dapat menyatukan model secara otomatis tanpa menentukan ukuran dari *mesh*, ini disebut *default mesh*. Ukuran *mesh* dapat ditentukan sendiri sesuai dengan kebutuhan.

5. Menentukan *Support* dan *Load*

Berfungsi untuk menentukan bagian yang akan menjadi *support* dan bagian yang akan menerima beban pada simulasi.

6. Mendapatkan solusi

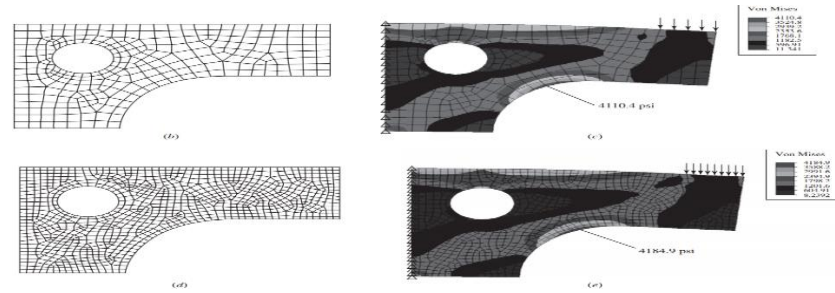
Solusi yang dihasilkan sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan oleh pengguna.

7. Meninjau hasil

Hasil ditampilkan dalam bentuk gambar, grafik, dan tabular data.

## 2.10 Meshing

Hubungan antara elemen dan *node* yang membedakan suatu wilayah disebut sebagai *mesh*. Kerapatan *mesh* meningkat karena lebih banyak elemen ditempatkan dalam wilayah tertentu. Perbaikan *mesh* elemen adalah ketika *mesh* elemen dimodifikasi dari suatu analisis model ke analisis berikutnya untuk menghasilkan hasil yang lebih baik. Hasil umumnya meningkat ketika kerapatan mesh ditingkatkan di area gradien tegangan atau ketika zona transisi geometris disatukan mulus. Secara umum, semakin tinggi kualitas *meshing* maka *finite element method* yang dilakukan akan lebih akurat. Contoh *mesh* elemen ditunjukkan pada gambar 2.13



**Gambar 2. 13** (a) meshing dengan 294 elemen dan 344 node (b) meshing dengan 1008 elemen dan 1096 node (Shigley, 2011)

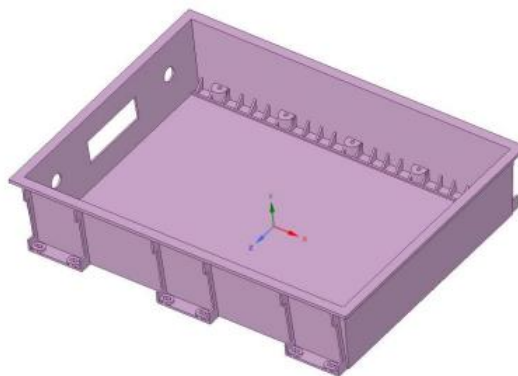
## 2.11 Kajian Pustaka Terdahulu

### 2.11.1 Penelitian Mengenai Model Analisis *Battery pack*

Referensi pertama dalam mengerjakan tugas akhir ini yaitu milik Jicheng Li, Xianhong Cao, dan Lin Guo pada tahun 2020 dari *School of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Technology and Business University, Kunming, China* mengenai “*Finite Element Analysis of Power Battery Box Chassis of Electric Bus*”. Pemahaman yang diambil dari penelitian ini berupa model analisis sasis *battery box* daya standar yang digunakan dalam analisis ini terbuat dari *aluminium alloy* dan parameter material ditunjukkan pada tabel 2.2. dan strukturnya ditunjukkan pada gambar 2.14.

**Tabel 2. 2** Karakteristik Parameter dari Aluminium alloy

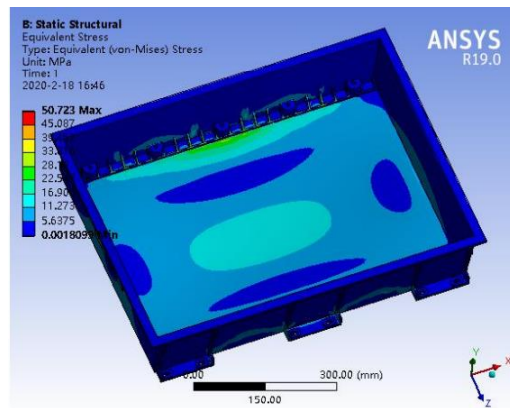
Material Name	Modulus of Elasticity/GPa	Poisson Ratio	Tensile Yield Strength/MPa	Density/kg·m <sup>-3</sup>
Aluminum Alloy	71	0.33	280	2770



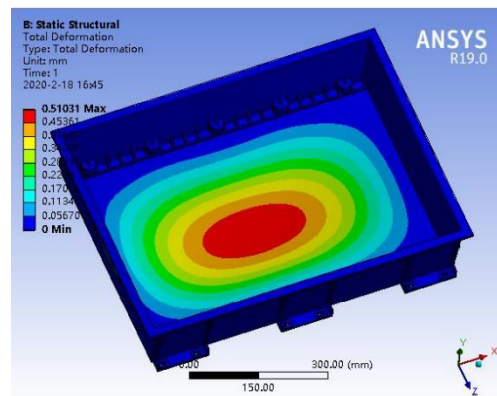
**Gambar 2. 14** Sasis *Battery box* standar

Dalam makalah ini, pemodelan dilakukan sesuai dengan standar *internasional battery box*, dan kejutan beban statis dan getaran dinamis dari *battery box* dari beberapa kondisi kerja yang berbeda dianalisis. *Battery pack* mencakup 8 modul dan, setiap modul terdiri dari 12 elemen baterai, modul di pasang dengan *holder*, konektor tegangan tinggi menghubungkan modul secara seri.

Menurut karakteristik struktural sasis *battery pack*, tetrahedron digunakan sebagai cara terkemuka untuk *mesh*. Setelah mendapatkan data *meshing* yang masuk akal, analisis statis dapat dilakukan.



**Gambar 2.15** *Cloud chart equivalent stress*



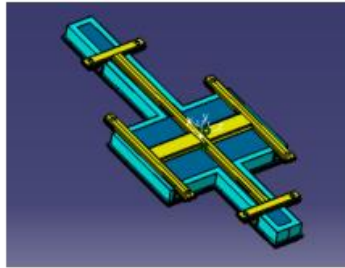
**Gambar 2.16** *cloud chart total deformation*

Gambar 2.15 adalah bagian dari *equivalent stress* dari *battery box*. Dari gambar terlihat bahwa tegangan terutama terjadi pada dua posisi, posisi pertama adalah sambungan sisi sasis dan bagian bawah. Posisi kedua adalah bagian tengah bawah. Tegangan ekivalen maksimum adalah 50,7 MPa, yang jauh lebih kecil dari nilai tegangan material yang diijinkan.

Gambar 2.16 adalah bagian deformasi total dari *battery box*. Hal ini dapat dilihat dari gambar bahwa deformasi maksimum terjadi di tengah bagian bawah, dan deformasi maksimum adalah 0,5 mm.

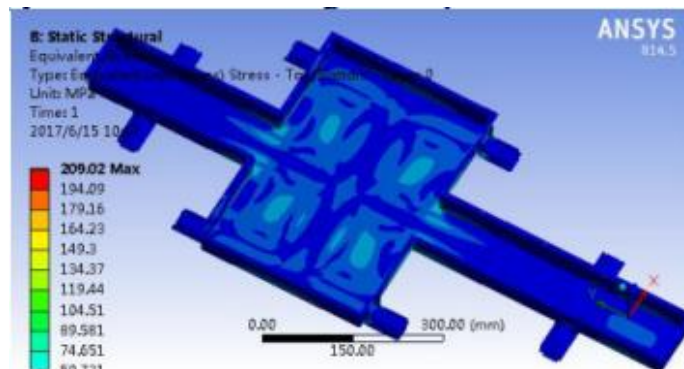
### 2.11.2 Penelitian Mengenai Dynamic dan Static Analysis pada Battery Box

Penelitian milik Na Yang, Rui Fang, Hongliang Li, dan Hui Xie pada tahun 2019 dari School of Mechanical Engineering, Tianjing University yang berjudul “*Dynamic and Static analysis of the battery box structure of an electric vehicle*” memiliki fokus mengenai analisis statik dan dinamis pada *battery box*. Pemahaman yang akan diambil dari penelitian ini merupakan material apa saja yang akan digunakan pada *battery box* dan pengujian statis serta dinamisnya. *Battery box* yang dipelajari dalam jurnal ini terdiri dari penutup atas, lingkaran samping, pelat bawah, braket dan kaki penyangga. *Steel DC03* dipilih untuk membuat penutup atas kotak baterai, lingkaran samping, braket dan pelat, dan *Steel SAPH440* dipilih untuk membuat bagian bawahnya.

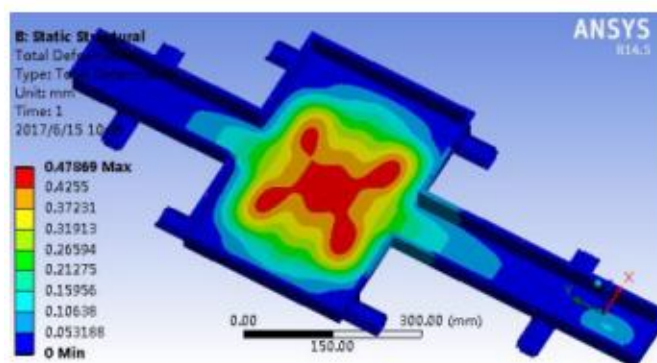


**Gambar 2. 17** 3D diagram dari *battery box*

Analisa statis pada *battery box*, karena percepatan mobil pada awalnya kecil, hanya tiga kondisi, yaitu jalan bergelombang, pengereman darurat dan berbelok tajam, dipertimbangkan. Ketika dianalisa dengan spesifik, kombinasi jalan bergelombang ditambah pengereman darurat dan belokan tajam dipertimbangkan, dan *boundary condition* adalah kendala semua *degrees of freedom*. Saat pembebanan ditambahkan, beban benturan yang dihasilkan oleh blok baterai setara dengan beban statis secara merata diterapkan ke node bawah dan bawah *battery box*. Dan *finite element analysis software* ANSYS dipakai untuk perhitungan. Gambar 2.16 (a) dan gambar 2.16 (b) menunjukkan daerah *stress diagram* dan perpindahan deformasi plat bawah *battery box* dan penutup samping saat mobil mengemudi di jalan bergelombang saat mengerem tajam.



(a)

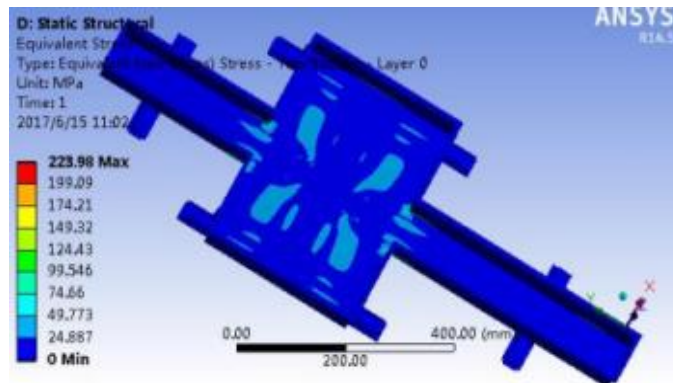


(b)

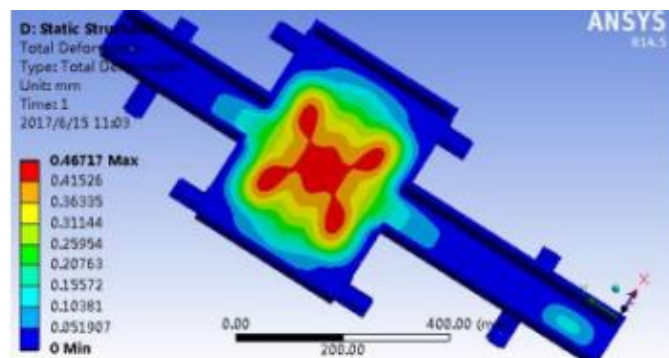
**Gambar 2. 18** (a) Daerah *stress diagram battery box* Ketika pengereman mendadak (b) deformasi dan perpindahan *battery box* Ketika pengereman mendadak



Gambar 2.18 (a) dan (b) menunjukkan daerah diagram *stress* dan perpindahan pelat bawah *battery box* dan perpindahan pelat bawah *battery box* dan lingkaran samping saat mobil melaju di jalan bergelombang saat berbelok tajam.



(a)

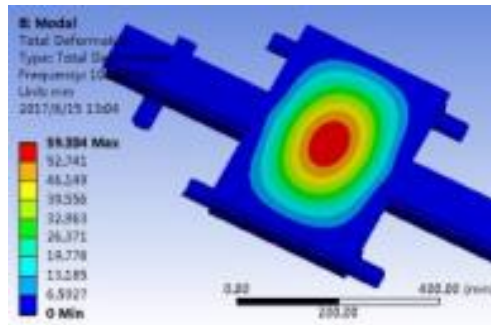


(b)

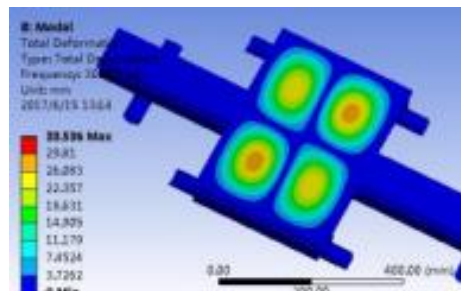
**Gambar 2. 19** (a) Daerah *stress diagram* pada *battery box* saat berbelok tajam (b) Deformasi dan perpindahan pada *battery box* saat berbelok tajam

Saat mengemudi, tegangan maksimum pada *battery box* adalah 209,02 mpa dalam kondisi tiba-tiba pengereman di jalan bergelombang, terutama di sudut sisi *battery box*. Dan itu 223.98 mpa di bawah kondisi tikungan tajam di jalan bergelombang. Tegangan maksimum *battery box* adalah 0,46 mm, terutama di bagian bawah kotak. Tegangan maksimum yang diterima oleh *battery box* saat dua kondisi kerja diatas semuanya lebih besar dari *yield limit Steel DC03* yaitu 170 Mpa.

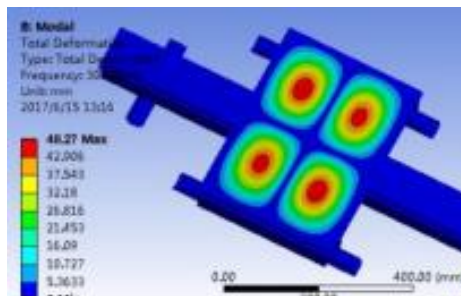
Analisis modal terutama digunakan untuk menghitung mode orde rendah dari *battery box*, di mana mode kendala *battery box* adalah untuk membatasi semua *degrees of freedom*. Beberapa bagian dari tujuh mode alami pertama ditunjukkan dalam gambar 2.20 (a),(b),(c),(d).



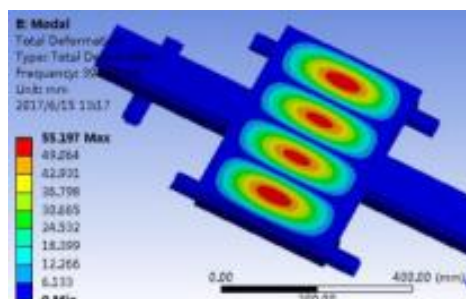
(a)



(b)



(c)

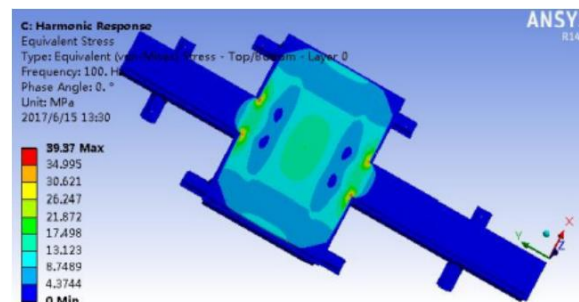


(d)

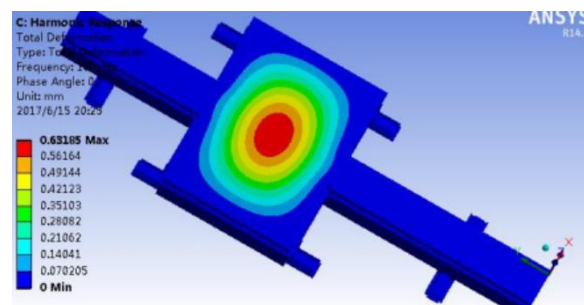
**Gambar 2. 20** (a) *Modal Shape 1* (b) *Modal shape 3* (c) *Modal shape 5* (d) *Modal shape 7*

Pada gambar 2.20(a) terdapat *Modal Shape 1* yang mempunyai deformasi maksimum sebesar 59,334 mm. Untuk gambar 2.20(b) terlihat *Modal Shape 3* yang mempunyai deformasi maksimum sebesar 33,536 mm. Untuk gambar 2.20(c) terlihat *Modal Shape 5* yang mempunyai deformasi maksimum sebesar 48,27 mm. Dan yang terakhir untuk gambar 2.20(d) terdapat *Modal Shape 7* yang mempunyai deformasi maksimum sebesar 55,197 mm.

Untuk mensimulasikan analisis getaran *battery box* redaman *structural battery box* diatur pada 0,03, permulaan frekuensi adalah 20 Hz, frekuensi terminasi adalah 100 Hz, Panjang Langkah adalah 2 Hz, jumlah Langkah adalah 40 langkah, dan beban percepatan 1 g diterapkan dalam arah vertikal *battery box*.



(a)



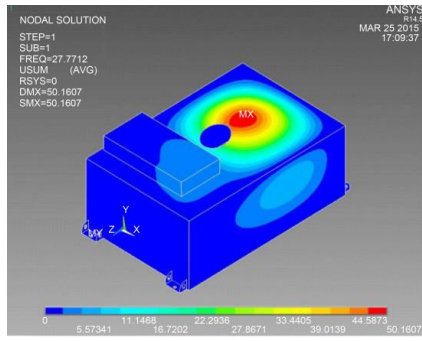
(b)

**Gambar 2. 21** *Stress dan Deformation pada box battery pack*

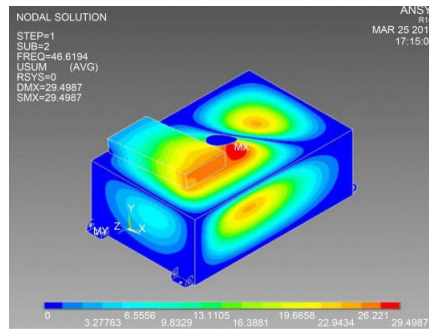
Gambar 2.21 (a) dan (b) menunjukkan daerah diagram distribusi tegangan internal dan perpindahan serta deformasi *battery box*. Dapat dilihat dari gambar bahwa tegangan maksimum terjadi pada keliling sisi dari *battery box*. Di mana tegangannya 39,37 Mpa yang jauh lebih kecil dari *yield limit Steel DC03*. Perpindahan maksimum didapatkan 0,63 di tengah penutup.

### 2.11.3 Penelitian Tentang Modal Analisis

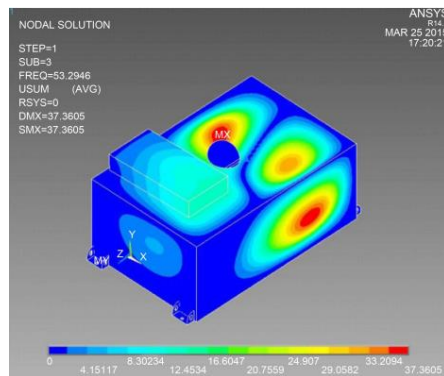
Penelitian milik Jianong Wang, Xiaoyu Zhao pada tahun 2016 dari College of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering and Science berjudul “*Modal Analysis of Battery Box Based on ANSYS*” menjelaskan cara menggunakan teori elemen hingga untuk menganalisis karakteristik modal dari *battery box* dan karakteristik getaran frekuensi. Memiliki pemahaman yang lebih komprehensif tentang kinerja dinamis *battery box* adalah kunci untuk memecahkan penelitian otomotif energi baru dan perkembangan teknologi.



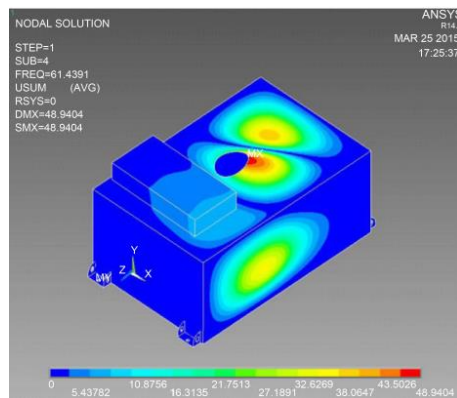
(a)



(b)



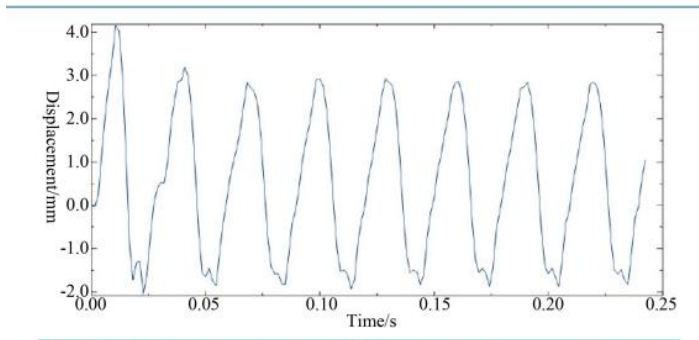
(c)



(d)

**Gambar 2. 22** *Vibration Deformation Cloud (a) First order mode (b) second order mode (c) third order mode (d) fourth order mode*

Gambar 2.22 menunjukkan bentuk mode nefogram deformasi *battery box* kendaraan listrik, tren deformasi spesifik jenis getaran orde pertama terutama untuk *battery box* di sekitar defleksi ke bawah sumbu Z, deformasi maksimum adalah 1,085 mm; mode getaran kedua pada *battery box* di sekitar sumbu Z defleksi, deformasi maksimum adalah 1,120 mm; model getaran urutan ketiga dari *battery box* di sekitar sumbu X defleksi, deformasi maksimum adalah 1,238; jenis kinerja getaran urutan keempat pada *battery box* sekitar defleksi sumbu Y, deformasi maksimum adalah 1,325 mm.



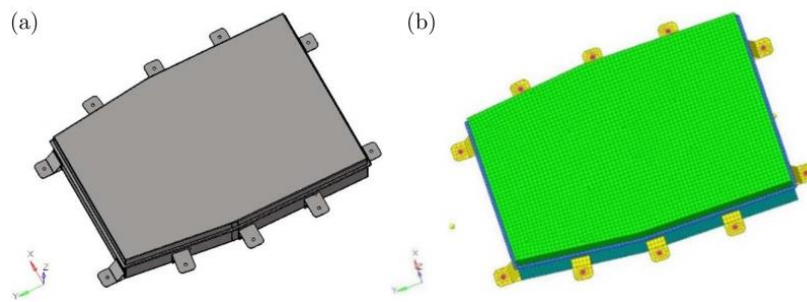
**Gambar 2. 23** Grafik waktu perpindahan dari simpul tengah penutup atas *battery box*

Ketika *battery box* berada dalam getaran kondisi tunak, kurva waktu perpindahan dari simpul tengah ditampilkan pada gambar 2.23. melalui kontras jenis getaran *battery box* dapat menarik kesimpulan berikut. Setiap order frekuensi natural yang sesuai dengan kondisi yang berbeda meskipun dengan ukuran numerik yang berbeda tetapi kecenderungan deformasi secara keseluruhan konsisten, *battery box* memiliki deformasi yang lebih besar, menunjukkan kekakuan material tidak cukup, meskipun kekuatan bahan untuk memenuhi kondisi, tetapi dalam pekerjaan yang sebenarnya dapat menyebabkan resonansi deformasi, Ketika desain perlu memperkuat kekakuan, deformasi struktur dasar *battery box* tinggi dan kekakuan kecil. Kegagalan resonansi yang lebih besar terjadi.

#### 2.11.4 Penelitian tentang Simulasi dan Optimasi Battery Pack

Penelitian milik Guanqiang Ruang, Changqing Yu, Xing Hu, dan Jing Hua pada tahun 2021 dari *School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai, China* berjudul “*Simulation and optimization of a new energy vehicle power battery pack structure*”. Makalah ini menjelaskan tentang penetapan model simulasi numerik untuk mempelajari dan mengoptimalkan struktur dari *battery pack* dari kendaraan dengan energi terbaru. Model mensimulasikan statis dan dinamis secara bersamaan dan mengoptimalkan struktur pada saat yang sama, yang tidak hanya memenuhi persyaratan kualitas, tetapi juga mewujudkan pemrosesan yang ringan.

*Battery pack* yang dipelajari dalam artikel ini adalah *battery pack lithium*, yang terletak di tengah sasis mobil. Daya totalnya adalah 22 kWh, kapasitas baterai adalah 60 Ah, dan totalnya tegangan baterai adalah 353 V. Bahan elemen *battery pack* adalah struktur aluminium yang dibuat oleh *ATL pride* dengan karakteristik ketahanan perbedaan suhu yang besar, nilai puncak yang lebih tinggi dari panas listrik, lebih dari 120 Wh/kg energi spesifik dari elemen baterai, dan 150 kilometer jarak tempuh mengemudi. *Battery pack* memiliki panjang 1700 mm, lebar 1200 mm, dan tinggi 210 mm. Penutup dan kotak masing masing dibentuk dengan *stamping* dan *die-casting aluminium steel*.



**Gambar 2. 24** (a) Geometri *Battery Pack*. (b) *Mesh* pada *Battery Pack*

Gambar 2.24(a) menunjukkan bentuk dari *battery pack*. *Battery pack* tersebut memiliki berat total sebesar 235 kg. Untuk Gambar 2.24(b) menunjukkan hasil *meshing* pada *battery pack* dengan menggunakan ANSYS.

**Tabel 2. 3** Tabel Properti Dari Material *Alluminium Alloy*

Material model	Elastic modulus [GPa]	Poisson's ratio	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Yield strength [MPa]
6061-T6	72	0.33	2800	276

Saat mobil melaju di jalan raya, pasti akan menemui beberapa lubang. Benturan yang dihasilkan oleh area ini akan diarahkan ke rangka oleh ban, dan kemudian di transmisikan dari *frame* ke *casing battery pack*. Dengan demikian sangat mudah untuk menyebabkan kerusakan longitudinal yang tidak terlihat atau deformasi yang jelas pada material dan struktur internal baterai, saat berputar, percepatan dan perlambatan akan menyebabkan tegangan pada struktur melintang, yang mengakibatkan batas hasil material kurang dari tegangan maksimum (Chung et al, 2018). Berikut ini adalah tiga kondisi kerja yang diberikan:

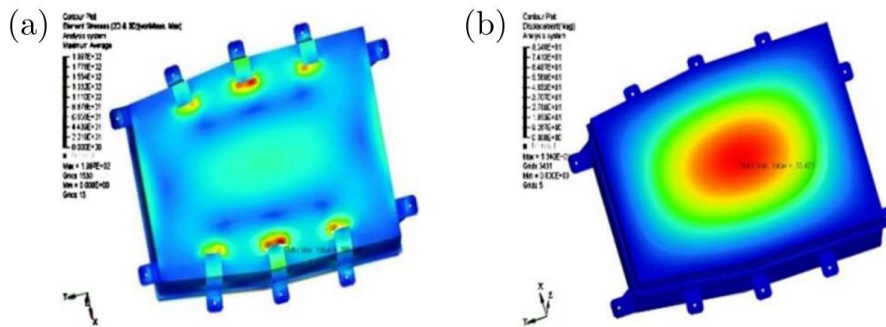
1. Kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Ini untuk mensimulasikan keadaan statis *battery pack* Ketika mobil berbelok di persimpangan dalam kondisi jalan yang buruk. Menurut literatur dan keadaan sebenarnya dari *battery pack*, diputuskan untuk memberikan putaran pada mobil dengan percepatan 1 g, percepatan 1 g tegak lurus ke tanah ketika bergelombang, dan akselerasi gravitasi 1 g.
2. Kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat. Ini adalah salah satu kondisi paling umum saat mengemudi kendaraan, menurut literatur, diputuskan untuk memberi mobil 1 g percepatan ke depan, 1 g percepatan tegak lurus ke permukaan jalan, dan percepatan 1 g karena gravitasi.
3. Kondisi benturan, akselerasi, deselerasi dan berbelok. Saat mobil melambat dengan cepat, mobil dipercepat oleh 1 g dalam arah yang berlawanan, Ketika sentripetal percepatan 1 g saat berbelok, percepatan tegak lurus permukaan jalan sebesar 1 g. dan percepatan gravitasi 1 g.



**Tabel 2. 4** Tabel parameter atau kondisi kerja pada *battery pack*

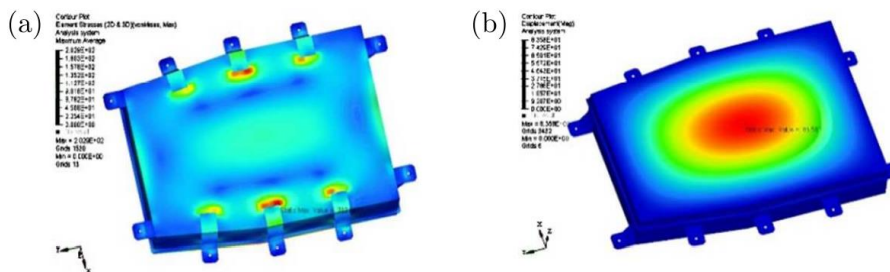
Working condition	<i>x</i> acceleration [g]	<i>y</i> acceleration [g]	<i>z</i> acceleration [g]
Bumpy and sharp turns	1	0	2
Bumpy and sharp acceleration	0	1	2
Bump acceleration and deceleration for turning	1	-1	2

Melalui analisis dan perhitungan elemen hingga, dengan beban percepatan di semua arah, tegangan beban maksimum *battery pack* pada kondisi kerja 1 dapat dilihat pada gambar 2.25



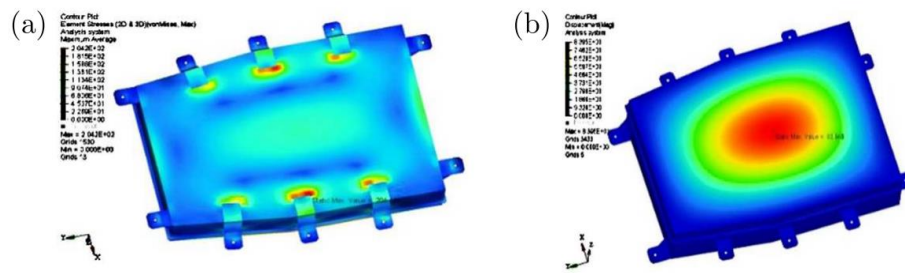
**Gambar 2. 25** (a) *stress* dari kondisi kerja 1 (b) deformasi pada kondisi kerja 1

Pada gambar 2.25 diatas terlihat tegangan beban maksimum sebesar 65,20 MPa yang jauh lebih rendah dari batas hasil material 6061-T6 sebesar 276 Mpa. Dan nilai deformasi maksimum yang terlihat sebesar 83 mm, posisinya berada di tengah atas penutup dan deformasi menjadi lebih kecil saat berputar. Dapat dijelaskan bahwa modul baterai dalam kemasan dapat menyerap deformasi dan perpindahan statis berlebih, dan itu juga dapat memastikan inti baterai bekerja secara normal, sehingga deformasi yang sebenarnya akan jauh lebih kecil, dan juga memiliki sedikit pengaruh pada rangkaian kabel tegangan tinggi dan rendah internal.



**Gambar 2. 26** (a) *stress* dari kondisi kerja 2. (b) deformasi pada kondisi kerja 2

Pada gambar 2.26 diatas terlihat tegangan maksimum sebesar 203 MPa. Tegangan maksimum ini juga tidak melebihi *yield stress* material sebesar 276 MPa. Deformasi maksimum adalah 86 mm, dan terletak di tengah penutup.



**Gambar 2. 27** (a) *stress* pada kondisi kerja 3. (b) deformasi pada kondisi kerja 3

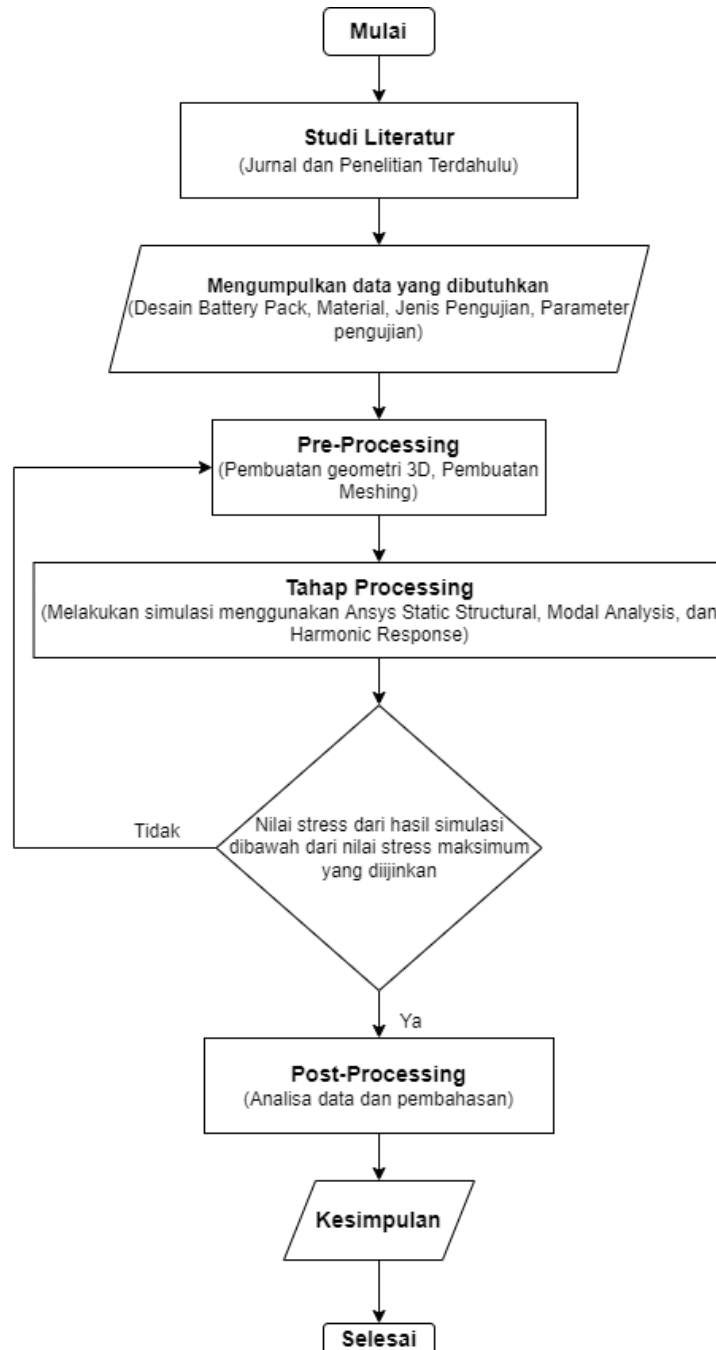
Kondisi kerja 3 adalah kondisi kinerja komprehensif yang mengedepankan lebih tinggi persyaratan pada kinerja material dan posisi setiap bagian kotak. Beban ditunjukkan pada table 4 diatas secara bersamaan diterapkan pada bagian sisi bawah, sisi depan dan sisi kanan kotak. Pada gambar 2.26 terlihat tegangan maksimum unit baterai adalah 204,2 MPa. Nilai deformasi maksimum yang ditampilkan adalah 83,7 mm dan lokasinya berada di tengah penutup atas.



## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Diagram Alir Pengujian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan untuk mengetahui respon statis dan dinamis pada *battery pack* akibat dari pembebanan statis dan dinamis akibat dari perbedaan kecepatan dan bentuk permukaan jalan. Dalam proses analisis dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram Alir Pengujian

### 3.2 Penjelasan diagram Alir

Berikut ini merupakan penjelasan dari diagram alir penelitian seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1

#### 3.2.1 Studi Literatur

Studi Literatur adalah serangkaian kegiatan yang berkenaan dengan metode pengumpulan data Pustaka, membaca dan mencatat, serta mengolah bahan penelitian. Literatur yang digunakan mengacu pada buku, jurnal, paten dan penelitian terdahulu serupa tentang Struktur *battery pack*, *static structural*, pengujian Statis, *multi degree of freedom*, *harmonic response*. Studi literatur lebih berfokus pada pemilihan material pada *battery pack* dan melakukan simulasi statis dan dinamis.

#### 3.2.2 Pengumpulan Data yang Dibutuhkan

Data yang dikumpulkan dan diolah mencakup data tentang material yang akan diuji, ketebalan dari material *battery pack* dan rincian pembebanan yang dialami oleh *battery pack*. Berikut ini merupakan model *battery pack* yang diadopsi dalam mendesain. Dengan mengikuti dimensi dari *battery pack*.



**Gambar 3. 2** model *battery pack* yang diadopsi dalam desain.(i.d.aliexpress.com)



**Gambar 3. 3** Posisi Peletakan pada *battery pack*.(kumparan.com)

Pada gambar 3.3 terdapat tempat pemasangan *battery pack* pada sepeda motor listrik. Dimana posisi *battery pack* tersebut diletakkan di dalam jok motor.

### 3.2.2.1 Material

Dalam sudut pandang mekanis, desain struktural merupakan langkah penting dalam produk desain, dan langkah penting lainnya adalah pemilihan material. Tujuannya adalah untuk menentukan sifat-sifat yang diperlukan dari material yang akan digunakan, dan kemudian pilih material yang paling cocok dari semua material yang ada. Sangat penting untuk memilih material yang tepat dalam proses pembentukan produk. Karena pemilihan material terjalin dengan semua aspek lainnya dari proses pembentukan produk, biasanya tidak terjadi di awal atau akhir proses, tetapi di dalam semua tahap. Sangat membantu untuk melakukan praseleksi dalam dalam tahap desain, yang dapat disempurnakan di proses berikut. Seperti bertanya harus serendah mungkin, dan juga harus memenuhi persyaratan tertentu untuk kekakuan dan kekuatan mekanik. Oleh karena itu, dalam pemilihan material, penekanan harus ditempatkan pada kepadatan. Jika kekakuan bagian lebih diperhatikan, itu harus fokus pada modulus elastisitas (E). tetapi mereka harus selalu dipertimbangkan dalam waktu yang sama.

**Tabel 3. 1** Data Material *Structural Steel*

Parameter	Nilai
Density	$7,85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Young Modulus	$2 \times 10^5 \text{ MPa}$
Poisson's Ratio	0,30
Bulk Modulus	$1,6667 \times 10^5 \text{ MPa}$
Shear Modulus	76923 MPa
Compressive Ultimate Strength	0 MPa
Compressive Yield Strength	250 MPa
Tensile Ultimate Strength	460 MPa
Tensile Yield Strength	250 MPa

**Tabel 3. 2** Data Material *Alluminium Alloy*

Parameter	Nilai
Density	$2,77 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Young Modulus	7100 MPa
Poisson's Ratio	0,330
Bulk Modulus	69608 MPa
Shear Modulus	26692 MPa
Compressive Ultimate Strength	0 MPa
Compressive Yield Strength	280 MPa
Tensile Ultimate Strength	310 MPa
Tensile Yield Strength	280 MPa

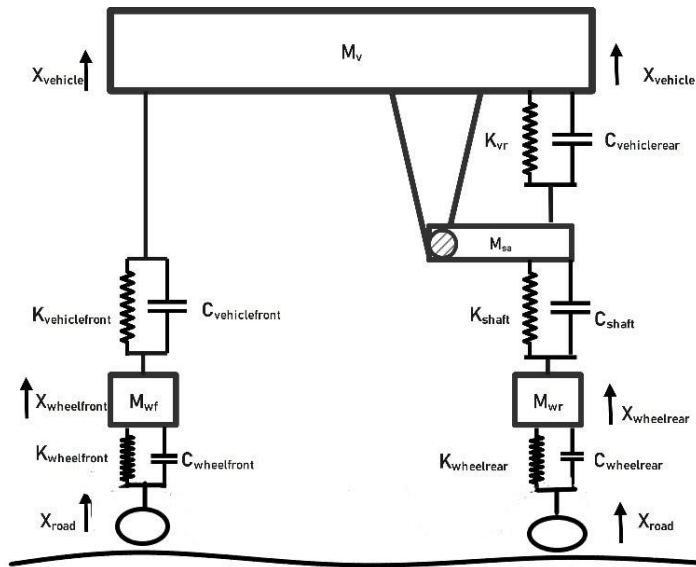
Pada tabel 3.1 dan 3.2 terdapat spesifikasi material yang akan digunakan adalah *structural steel* dan *aluminium alloy*. Material ini dipilih sesuai dengan penelitian terdahulu yang menggunakan material yang sama. Selain itu juga ketersediaan material di pasaran Indonesia dan kemudahan untuk mendapatkannya.

### **3.2.2.2 FBD dan Model Dinamis**

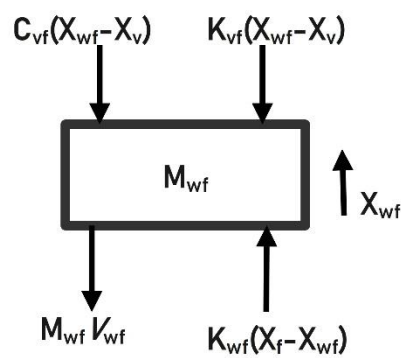
#### **3.2.2.2.1 Model dinamis setengah kendaraan**

Pada penggunaan model dinamika kendaraan untuk mempelajari perilaku kendaraan dan desain sistem kendali kendaraan telah berkembang dengan sangat baik sela beberapa dekade terakhir. Untuk menguji metode kontrol baru, perlu dikembangkan model virtual yang mempresentasikan kendaraan secara tepat, sehingga metode kontrol dapat diuji sebelum implementasi fisik. Sejauh ini, banyak model kendaraan yang berbeda telah digunakan untuk aplikasi yang berbeda. Model praktis yang umum digunakan untuk kendaraan, seperti model-model setengah kendaraan, model penuh kendaraan dan pada kendaraan roda empat terdapat juga model perempat.

Pada peneltian ini akan menggunakan model penuh kendaraan. Model ini terdiri dari *sprung mass* dan *unsprung mass* peredam dan pegas pada sistem suspensi. Untuk lebih lanjutnya dijelaskan pada gambar 3.4



**Gambar 3. 4** Model penuh dinamis kendaraan untuk *E-Scooter*



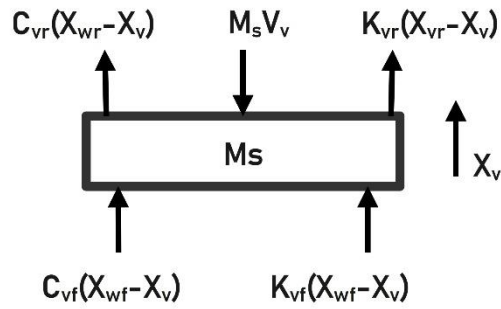
**Gambar 3. 5** FBD ditinjau dari roda depan

Berikut merupakan persamaan dan *state variable equation* :

$$k_{wf}(x_f - x_{wf}) - C_{vf}(\dot{x}_{wf} - \dot{x}_v) - k_{vf}(x_{wf} - x_v) - m_{wf}\ddot{x}_{wf} = 0 \quad 3.1$$

$$\ddot{x}_{wf} = \frac{1}{m_{wf}}(k_{wf}(x_f - x_{wf}) - C_{vf}(\dot{x}_{wf} - \dot{x}_v - \dot{x}_v) - k_{vf}(x_{wf} - x_v - x_v)) \quad 3.2$$

Selanjutnya ditinjau dari bodi *E-Scooter*



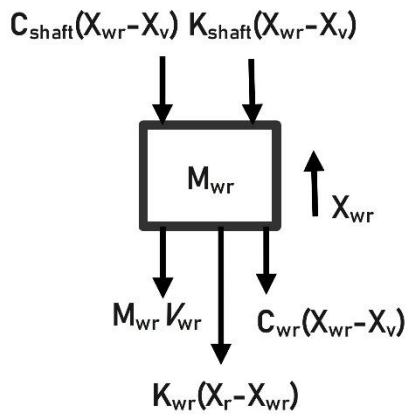
**Gambar 3. 6** FBD ditinjau bodi *E-Scooter*

Berikut merupakan persamaan dan *state variable equation* :

$$m_s \ddot{v}_v - C_{vf}(\dot{x}_{wf} - \dot{x}_v) - k_{vf}(x_{wf} - x_s) - c_{vr}(\dot{x}_{wr} - \dot{x}_s) - k_{vr}(x_{wr} - x_s) = 0 \quad 3.3$$

$$\ddot{v}_v = \frac{1}{m_s} (C_{vf}(\dot{x}_{wf} - \dot{x}_v) - k_{vf}(x_{wf} - x_s) - c_{vr}(\dot{x}_{wr} - \dot{x}_s) - k_{vr}(x_{wr} - x_s)) = 0 \quad 3.4$$

Selanjutnya ditinjau dari dari roda belakng *E-Scooter*



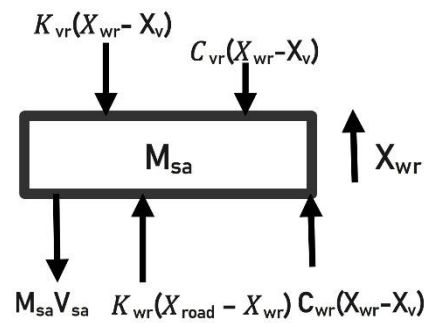
**Gambar 3. 7** FBD ditinjau dari roda belakng *E-Scooter*

Berikut merupakan persamaan dan *state variable equation* :

$$c_{wr}(\dot{x}_{wr} - \dot{x}_v) + k_{shaft}(x_{wr} - x_v) + k_{wr}(x_r - x_{wr}) - C_{shaft}(x_{wr} - x_v) + M_{wr} \ddot{v}_{wr} = 0 \quad 3.5$$

$$\ddot{v}_{wr} = \frac{1}{M_{wr}} (-c_{vr}(\dot{x}_{wr} - \dot{x}_{vr} - \dot{x}_v) - k_{vr}(x_{wr} - x_{vr} - x_v) - k_{wf}(x_r - x_{wr}) + C_{sa}(x_{wr} - x_{vr} - x_v)) \quad 3.6$$

Selanjutnya adalah ditinjau dari *swingarm E-Scooter*



**Gambar 3. 8** FBD ditinjau dari swingarm *E-Scooter*

Berikut merupakan persamaan dan *state variable equation* :

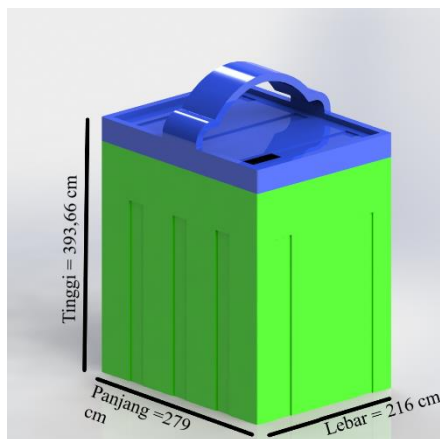
$$K_{vr}(K_{wr} - X_v) + C_{vr}(\dot{x}_{wr} - \dot{x}_v) - k_{wr}(X_{road} - X_{wr}) - C_{wr}(\dot{x}_{wr} - \dot{x}_v) + M_{sa}\ddot{V}_{sa} = 0 \quad 3.7$$

$$\ddot{V}_{sa} = -\frac{1}{M_{sa}}(K_{vr}(K_{wr} - X_{vr} - X_v) + C_{vr}(\dot{x}_{wr} - \dot{x}_{wr} - \dot{x}_v) - k_{wr}(X_{road} - X_{wr}) + C_{wr}(\dot{x}_{wr} - \dot{x}_v)) \quad 3.8$$

### 3.2.3 Pre-Processing

#### 3.2.3.1 Model Geometri *Battery Pack*

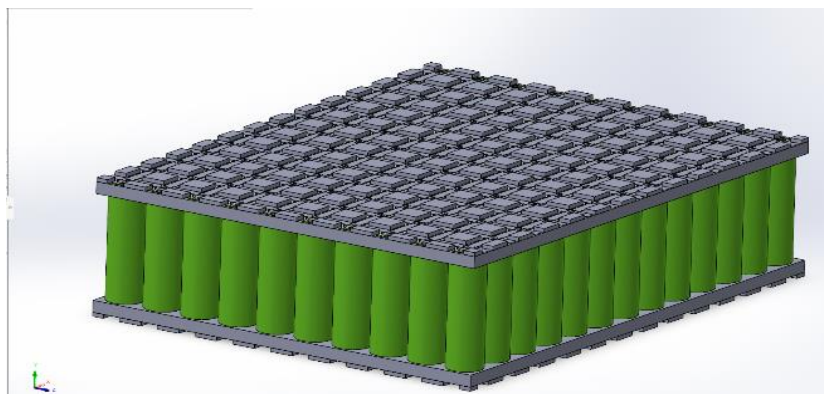
Berikut adalah model geometri dari desain *battery pack* yang telah di desain dengan aplikasi Solidwork 2021.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 3. 9** Model Geometri *Battery Pack* (a) model penuh *battery pack* (b) model *battery pack* setelah dihilangkan Sebagian (c) *Battery Module*

Pada gambar 3.9 terdapat model geometri dari *casing battery pack*. *Battery pack* tersebut terdiri dari beberapa bagian yang telah di *assembly*. Mulai dari atas terdapat tutup *battery pack* yang mempunyai pegangan agar dapat memudahkan orang untuk membawa dan memasukkan *battery pack* ke dalam tempatnya. Kemudian terdapat juga sel baterai Sony VTC 4 18650 berwarna hijau yang berjumlah 520 buah. Baterai tersebut dirangkai secara seri dan paralel. Untuk seri berjumlah 13 buah dan paralel berjumlah 10 buah dalam satu modul. Modul disini berjumlah 4 buah. Dimana tiap modulnya berisi 130 buah baterai yang terpasang secara seri maupun paralel. Baterai tersebut di *hold* dengan *holder* dan juga sudah terpasang *connector* yang menghubungkan rangkaian baterai tersebut. Dan terakhir dibungkus dengan *cover* dengan dua jenis material yang berbeda. Seperti material yang sudah disebutkan di tabel 3.1 dan 3.2, disini *cover battery pack* akan menggunakan *material Structural Steel* dan *Aluminium Alloy*.

Massa dari *battery pack* diatas tanpa dimasukkan ke dalam *cover* yaitu 10 kg. Untuk penelitian ini massa dari *battery pack* tanpa *cover* akan dijadikan beban yang diterima oleh *cover* dari *battery pack* yang akan diuji. Untuk dimensi dari *battery pack* diatas bisa dilihat pada tabel 3.3

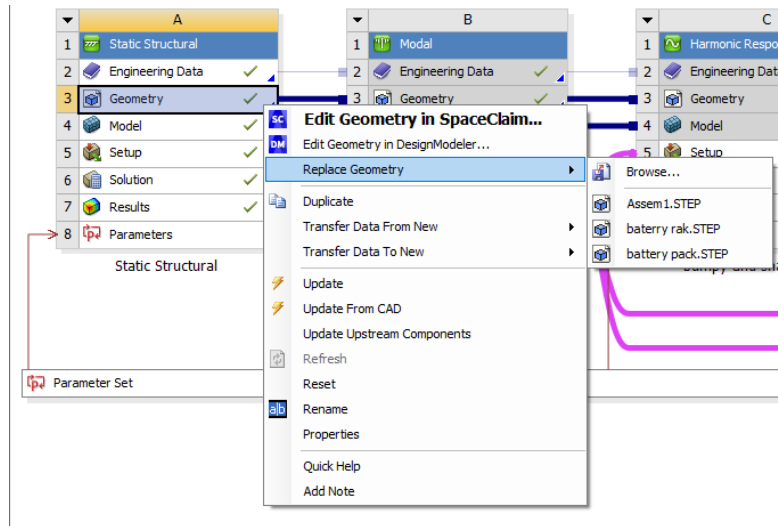
**Tabel 3. 3** Dimensi dari *Battery Pack*

Parameter	Nilai (mm)
Panjang	279 mm
Tinggi	393,66 mm
Lebar	216 mm
Tebal	3 mm

### 3.2.3.2 Proses import geometri *battery pack*

Setelah membuat geometri menggunakan *software solidworks 2021* lalu disimpan dengan format file STEP (.STP) hal ini dilakukan agar format file dapat terbaca oleh *software ANSYS R2 2020*. Fitur yang digunakan *import* geometri pada ANSYS adalah *spaceclaim*. Untuk melakukan *import* geometri dari Solidwork dapat dilihat pada gambar 3.10





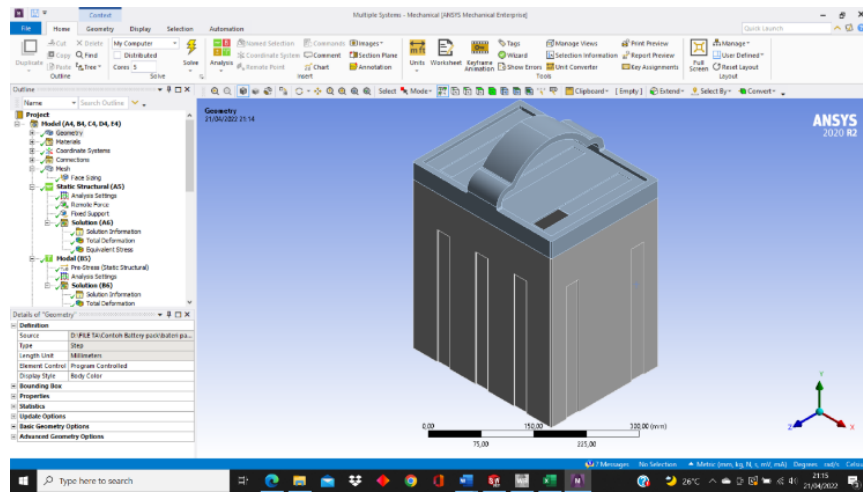
**Gambar 3. 10** Proses import geometri *battery pack* pada ANSYS

Pada gambar 3.10 terdapat pilihan geometri. Setelah itu klik kanan dan akan muncul beberapa pilihan menu yang bisa dipilih. Kemudian tekan *insert* geometri atau *replace* geometri. Lalu pilih *browse* dan cari file Solidwork yang telah disimpan dengan format file STEP (.STP). Setelah itu akan muncul bentuk geometri pada aplikasi ANSYS seperti gambar 3.9

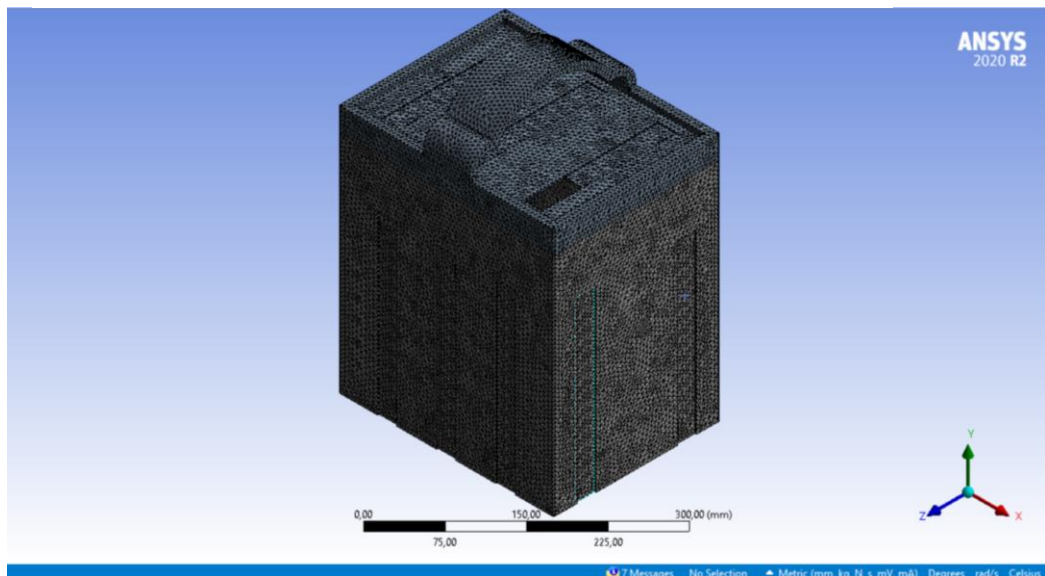
### 3.2.3.3 Mesh

*Mesh* adalah bagian integral dari proses simulasi Teknik yang dimana geometri kompleks dibagi menjadi elemen sederhana yang dapat digunakan sebagai pendekatan lokal diskrit dari domain yang lebih besar.

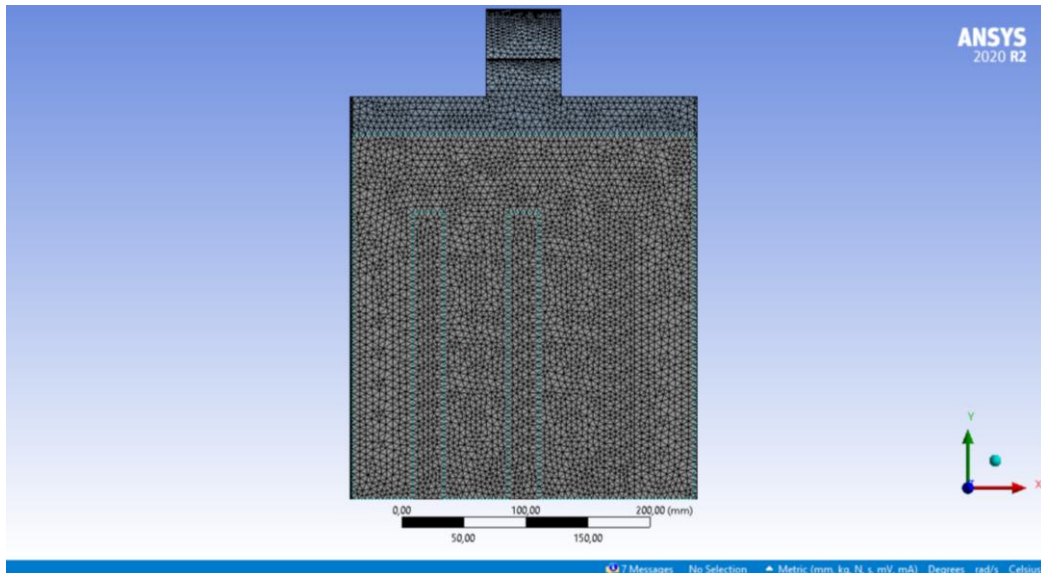
Proses *meshing* sangat mempengaruhi hasil simulasi yang dilakukan, oleh karena itu pada proses *meshing* dilakukan pengaturan parameter sesuai dengan kebutuhan penelitian. Metode *meshing* yang digunakan pada simulasi ini adalah *patch independent*. Setelah melakukan uji konvergensi didapatkan bahwa *meshing* yang stabil terjadi pada elemen *size* 5 mm dengan bentuk berupa elemen berupa tetrahedron seperti pada gambar 3.12



**Gambar 3. 11** Tampilan geometri *battery pack* pada aplikasi ANSYS



(a)



(b)

**Gambar 3. 12** Tampak *meshing* pada *battery pack* (a) tampak isometri *mesh* pada *battery pack* (b) tampak samping *mesh* pada *battery pack*

Terlihat pada gambar 3.12 bahwa *mesh* yang terbentuk dengan menggunakan *mesh default* dari geometri adalah *mesh* tetrahedron dan beberapa *trimesh* pada bagian bagian permukaan yang mengecil.

### 3.2.3.3.1 Uji Konvergensi Meshing

Setelah *generate mesh* dilakukan uji konvergensi *mesh* pada geometri agar didapatkan kualitas *meshing* yang baik. Jenis metode yang digunakan pada uji konvergensi ini adalah *body sizing* dengan menggunakan 6 iterasi dengan kesalahan atau error dibawah 5% dan didapatkan *orthogonal quality* dan *skewness* yang sesuai dengan *mesh metric spectrum* seperti gambar 3.13. Agar didapatkan sebuah hasil yang paling menggambarkan keadaan sesungguhnya dalam jumlah elemen *meshing* yang tepat. Variasi *mesh sizing* yang digunakan terlihat seperti grafik 3.14.

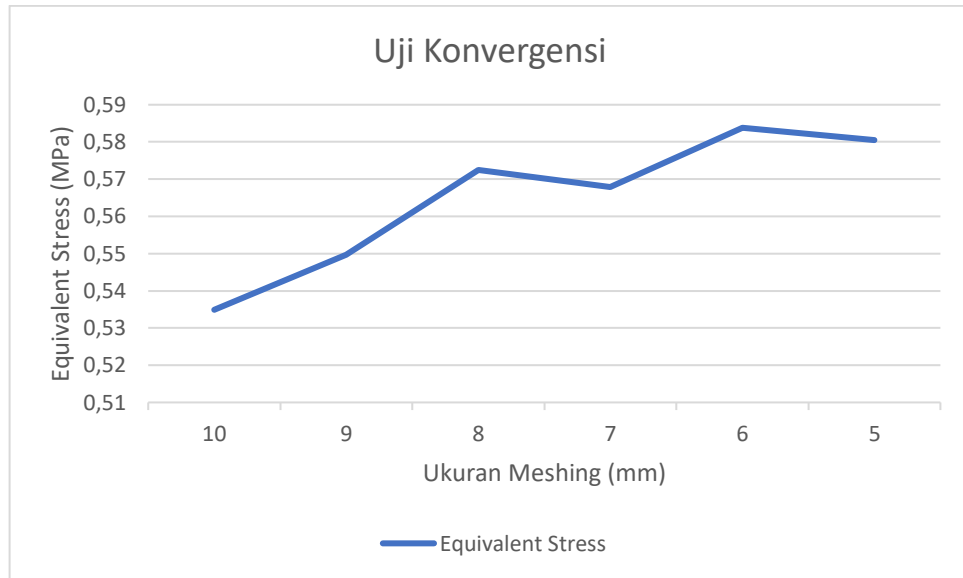
Skewness mesh metrics spectrum:

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

**Gambar 3. 13** *orthogonal quality* dan *skewness mesh metric spectrum*



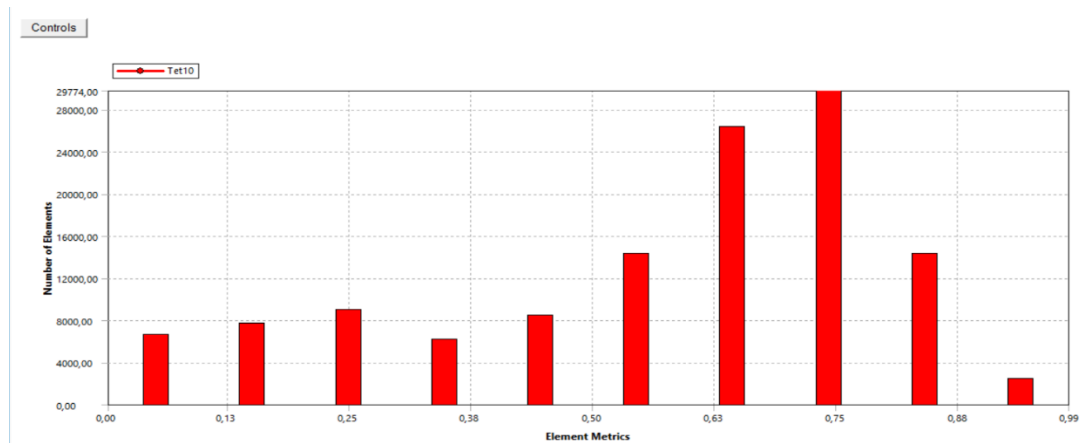
**Gambar 3.14** grafik perbandingan antara nilai *stress* dengan ukuran dari *mesh*

Dari gambar grafik 3.14 diatas dapat disimpulkan bahwa dari 6 *mesh* yang ada, ukuran sebesar 5 mm pada *mesh* adalah yang paling konvergen dengan data sebagai berikut.

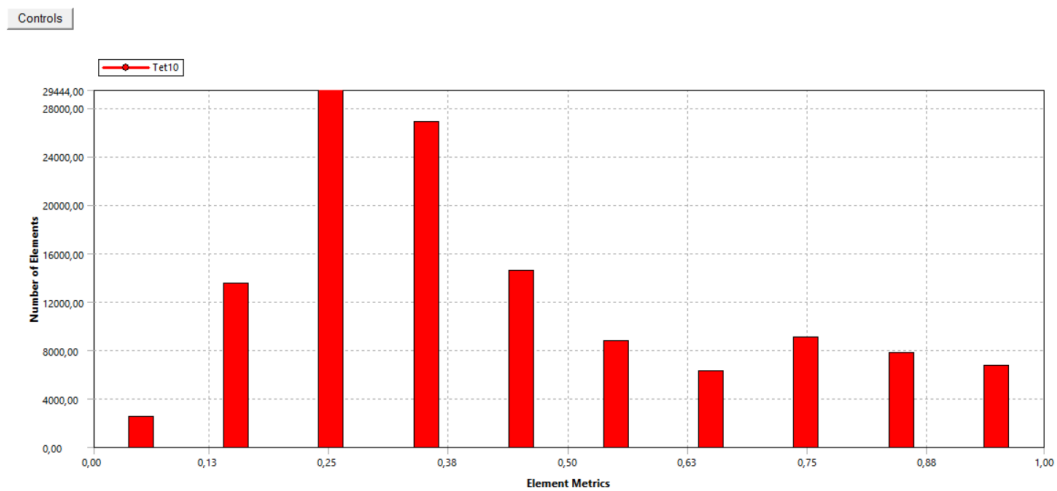
**Tabel 3.4** Tabel konvergensi *meshing*

Ukuran Meshing	Equivalent Stress	Error	Total Deformation	Error
10	0,534894653		0,000257503	
9	0,549632021	2,68%	0,000257605	0,04%
8	0,572520384	4,00%	0,000257732	0,05%
7	0,567912897	0,81%	0,000257861	0,05%
6	0,583806181	2,72%	0,000257977	0,05%
5	0,580533084	0,56%	0,000258075	0,04%

Berikut ini merupakan *element metrics* setelah dilakukannya uji konvergensi *meshing*



(a)



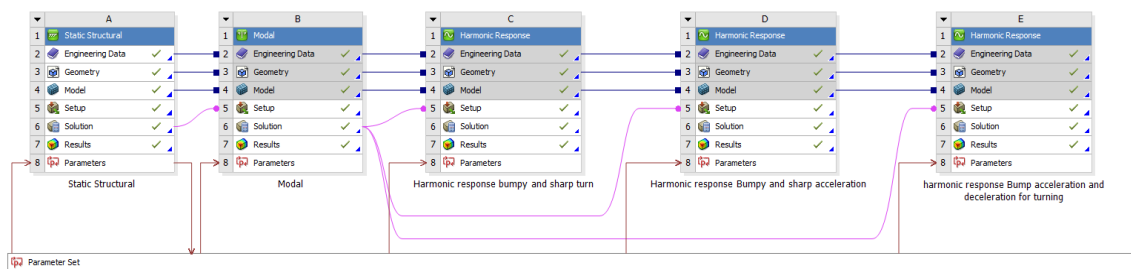
(b)

**Gambar 3. 15** diagram batang dari *meshing quality* dari geometri *battery pack* (a) *element metrics Orthogonal quality* (b) *element metrics skewness*

Terlihat dari gambar 3.15 untuk *orthogonal quality* memiliki nilai minimal mendekati nol dan nilai maksimumnya adalah 0,98958. Untuk nilai rata-ratanya berada di 0,56657. Nilai ini berada pada area *good* pada *orthogonal quality mesh spectrum*. Untuk kualitas dari *skewness* cukup kecil dengan nilai minimumnya mendekati angka nol dan nilai maksimumnya 0,99739 dan nilai rata-rata *skewness*nya adalah 0,43256. Nilai ini berada pada area *very good* pada *skewness mesh spectrum*.

### 3.2.4 Tahap processing

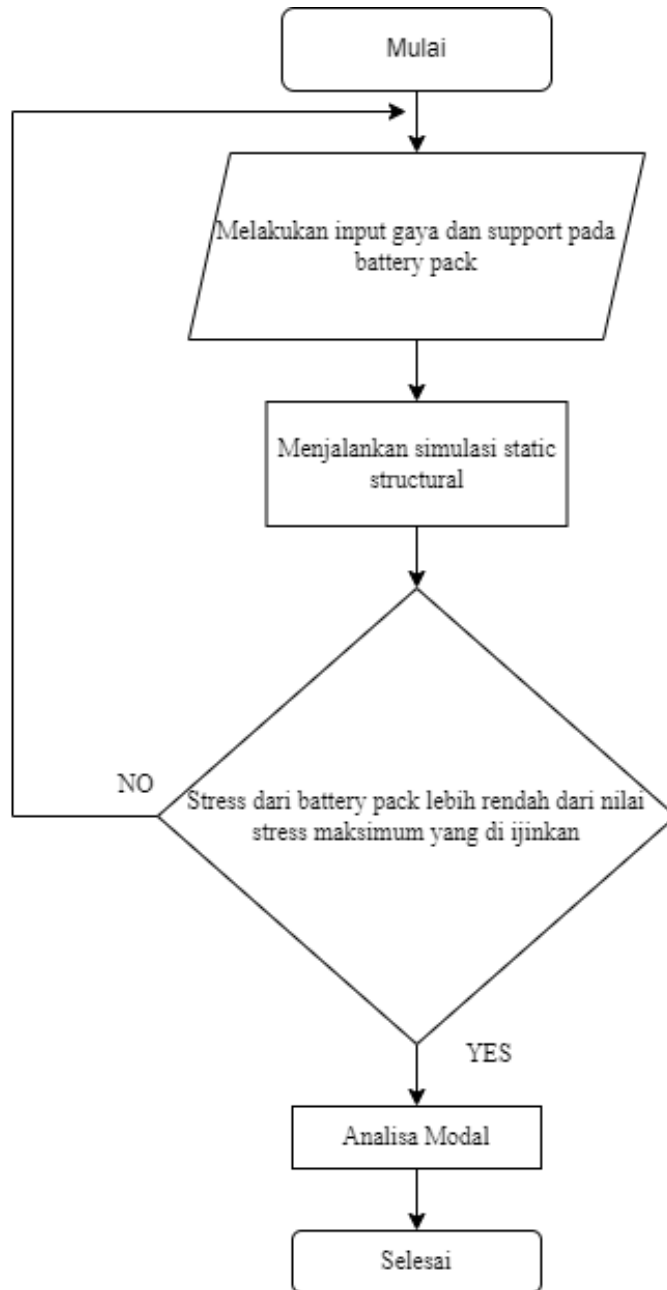
Tahap *processing*, merupakan parameter-parameter yang telah ditetapkan untuk domain simulasi akan diolah secara numerik. Berikut merupakan tahap *processing* menggunakan ANSYS R2 2020.



**Gambar 3. 16** tahap *processing* menggunakan ANSYS R2 2020

#### 3.2.4.1 Pengujian Statis (Static Structural)

Struktural analisis merupakan Analisa yang paling banyak digunakan dengan menggunakan prinsip *finite element*. Ada beberapa macam jenis simulasi *static structural*, dimana pada program ANSYS akan terdapat perhitungan tegangan dan regangan. *Static* analisis ini digunakan untuk menentukan dan menganalisa tegangan dan menentukan *displacements* benda pada beban *static*. *Static* analisis dapat digunakan pada linier maupun nonlinier *static* analisis. Berikut merupakan diagram alir pada Analisa FEM menggunakan *static structural*.



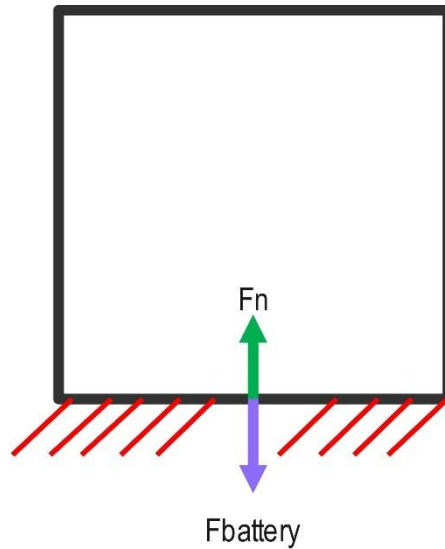
**Gambar 3. 17** Diagram alir pada Analisa *static structural*

#### 3.2.4.1.1 Beban statis pada battery pack

Gaya gaya yang diinput pada Analisa ini didapatkan melalui perhitungan beban yang bekerja pada kendaraan seperti berat kendaraan, berat penumpang dan pengendara, berat dari isi *cover battery pack*.

1. Berat kendaraan : 120 kg
2. Berat penumpang dan pengendara : 120 kg
3. Berat battery pack secara keseluruhan diluar cover : 10 kg

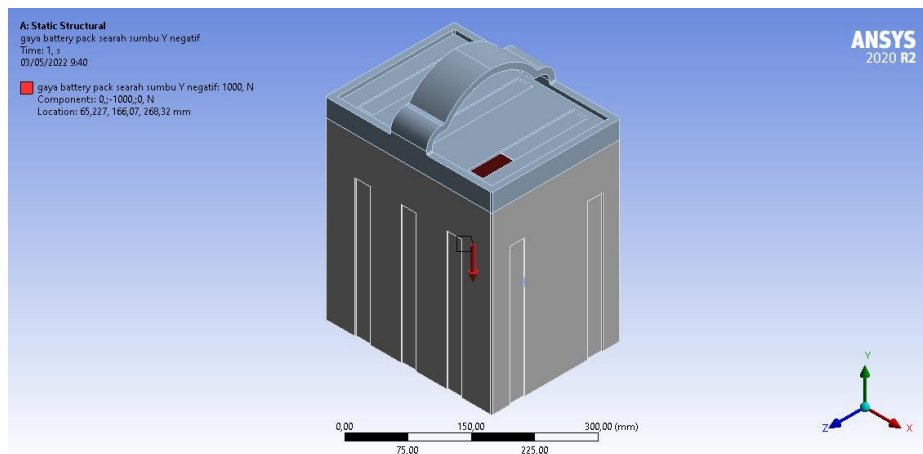
Berat dari motor *E-scooter*, pengendara dan penumpang sendiri pada penelitian tugas akhir kali ini diabaikan dikarenakan efek yang ditimbulkan terhadap *battery pack* tidak ada. Pada penelitian kali ini diasumsikan bahwa berat bersih atau beban yang ditopang oleh *cover battery pack* sebesar 10 kg. Dimana gaya yang didapatkan adalah sebesar 98,1 N.



**Gambar 3. 18** Free body diagram pada beban statis

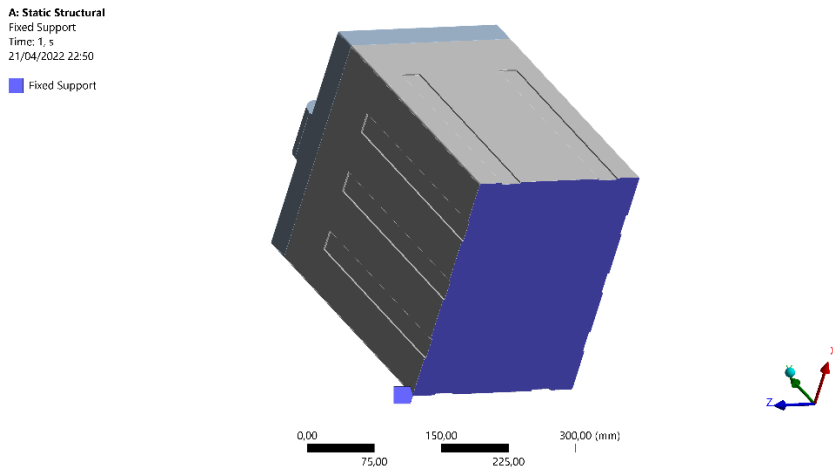
### 3.2.4.1.2 Batas kondisi dan pembebanan pada battery pack

Batas kondisi (boundary condition) adalah kondisi-kondisi batas atau kontrol perhitungan yang dimasukkan sebelum dilakukan proses simulasi. Boundary condition yang akan ditentukan antara lain adalah titik tumpuan (support), titik peletakan beban.



**Gambar 3. 19** gaya *battery pack* searah sumbu Y *negative*

Pada gambar 3.19 adalah gaya *battery pack* yang searah dengan sumbu Y negatif. Gaya ini mempunyai besar yaitu 98,1 N. untuk 98,1 N ini didapatkan dari massa *battery pack* tanpa cover dikali dengan percepatan gravitasi sebesar  $9,81 \text{ m/s}^2$  yang menjadi berat bersih atau beban yang ditopang oleh *cover battery pack*.



**Gambar 3. 20** *fix support* pada *battery pack*

Pada gambar 3.20 terlihat *fix support* yang terdapat di bagian bawah *cover battery pack*. Bagian bawah ini merupakan bagian yang menopang berat bersih *battery pack* atau beban yang ditopang oleh *battery pack*.

### 3.2.4.1.3 Solution

Pada penelitian tugas akhir dengan topik *battery pack* ini solusi yang diinginkan berupa deformasi dan *stress von-misses* yang terjadi pada *battery pack*. Hal ini diharapkan agar mengetahui desain dan ketebalan *battery pack* sudah aman dan sesuai kebutuhan untuk *E-scooter*.

### 3.2.4.1.4 Modal Analysis

Modal *analysis* atau Analisa modal dilakukan untuk menentukan frekuensi natural dan *mode shape* dari struktur. Pada Analisa ini dilakukan pencarian 15 *mode shape* pada *casing battery pack*. Pembebanan maksimum dengan *set-up boundary condition* pada modal *analysis* yang sama dengan *set-up boundary condition* pada *static structural* seperti pada gambar 3.17 dan 3.18.

Details of "Analysis Settings"	
<b>Options</b>	
Max Modes to Find	15
Limit Search to Range	No
Spin Softening	Program Controlled
<b>Solver Controls</b>	
Damped	No
Solver Type	Program Controlled
<b>Rotordynamics Controls</b>	
Coriolis Effect	Off
Campbell Diagram	Off
<b>Output Controls</b>	
<b>Analysis Data Management</b>	
Solver Files Directory	D:\file ta material ss\Simulasi TA_...
Future Analysis	MSUP Analyses
Scratch Solver Files ...	
Save MAPDL db	Yes
Contact Summary	Program Controlled
Delete Unneeded Fil...	Yes
Solver Units	Active System

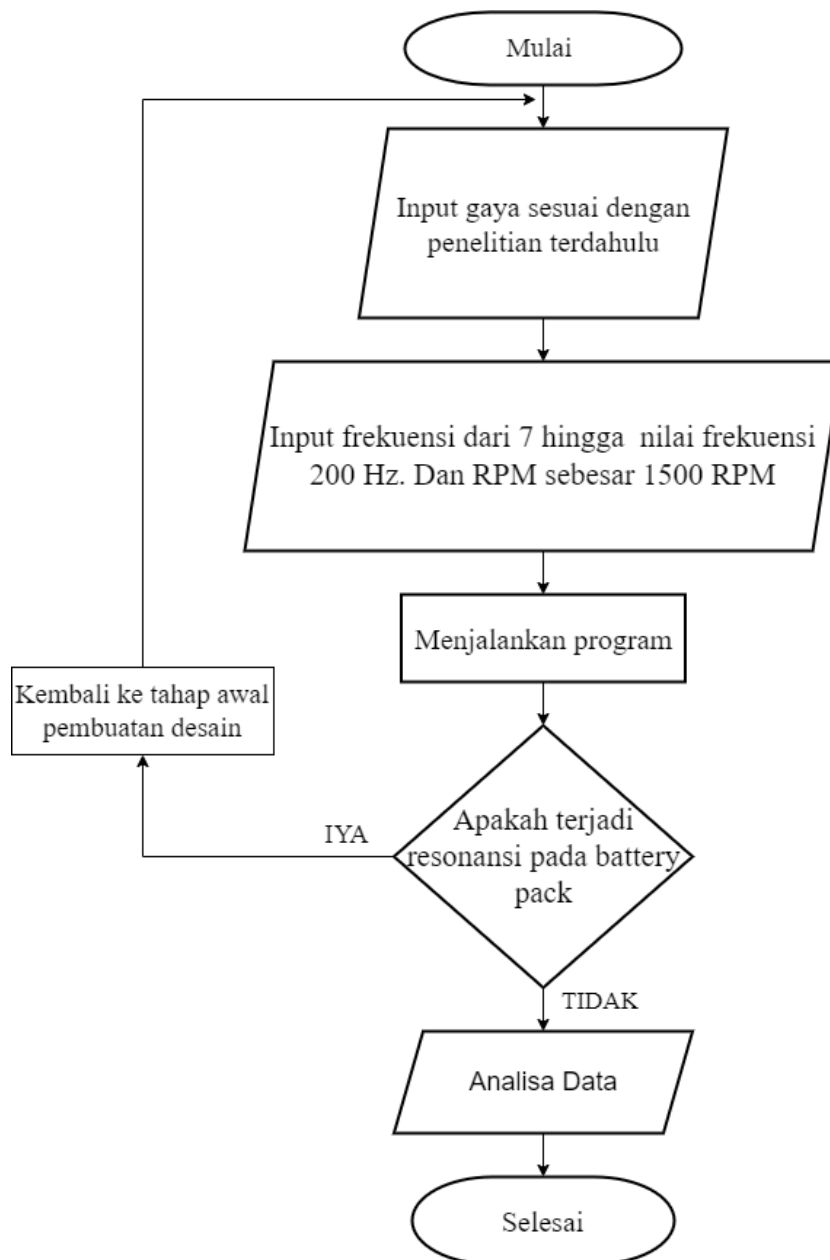
**Gambar 3. 21** Analisa *Setting* pada *Modal Analysis*



Pada gambar 3.21 terlihat detail pada analisa setting yang digunakan untuk modal analysis. Untuk jumlah mode shape maksimal disini berjumlah sebanyak 15 *mode shape* yang nantinya akan didapatkan juga frekuensi natural dari *casing battery pack*.

### 3.2.4.2 Pengujian Dinamis

Setelah melakukan pengujian *static structural* dan modal *analysis* akan dilakukan dinamis menggunakan *harmonic response*. *Harmonic* analisis digunakan untuk menentukan respon *steady state* dari struktur terhadap beban yang bervariasi secara sinusoidal dengan waktu, yang memungkinkan untuk memverifikasi apakah desain yang dibuat akan berhasil mengatasi resonansi atau efek berbahaya lainnya dari sebuah getaran yang berlebihan. Hasil dari natural frekuensi dan modus getar yang didapat dari modal analisis akan digunakan pada *harmonic* analisis ini. Berikut ini adalah *flowchart* pengujian dinamis yang akan dilakukan.



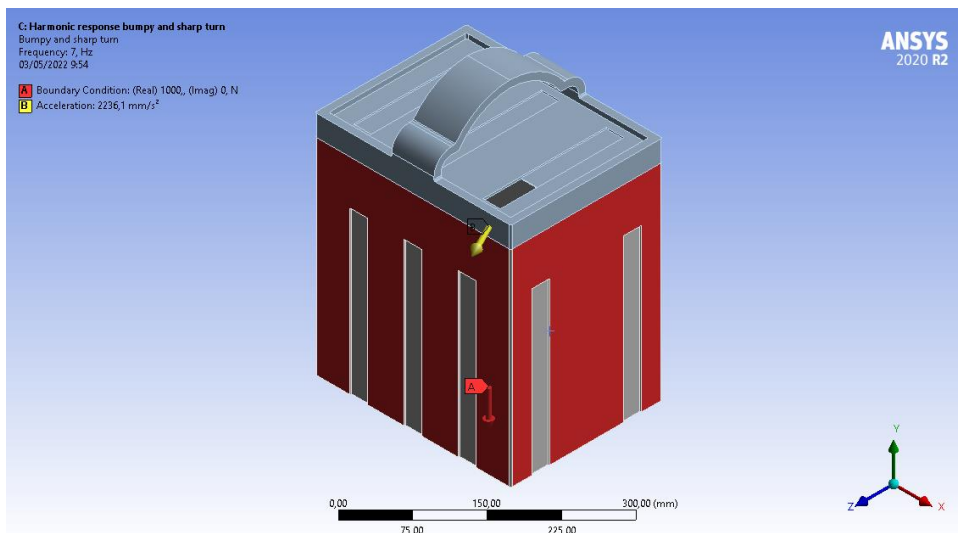
**Gambar 3. 22** Diagram alir pada pengujian dinamis

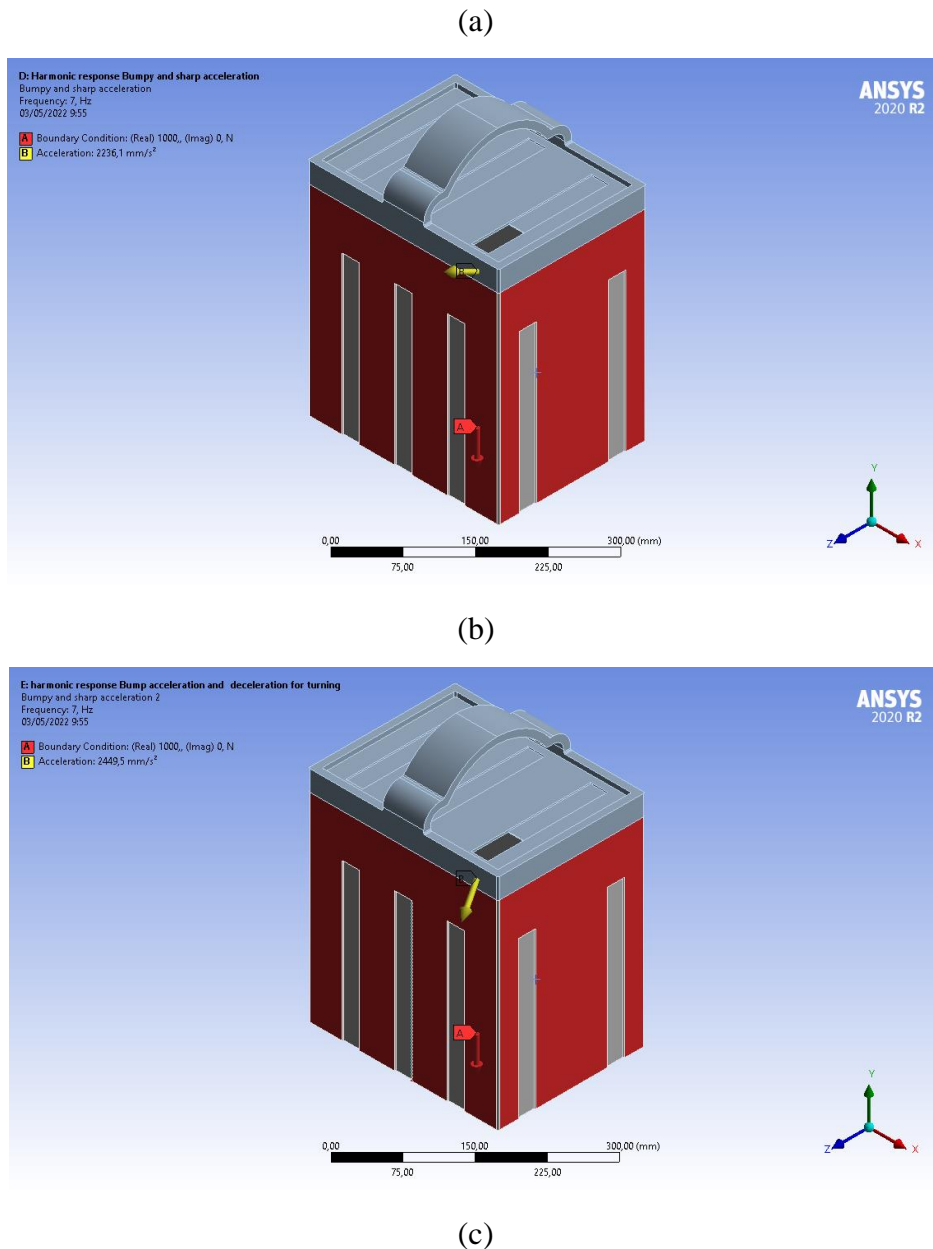
Hasil yang diharapkan dari pengujian harmonic response adalah nilai stress, deformasi, dan juga respon dinamis dari geometri battery pack saat diberikan beban secara sinusoidal. Berikut merupakan Analysis setting dan boundary condition yang akan dipakai pada harmonic response.

Details of "Analysis Settings"	
<b>Step Controls</b>	
Multiple RPMs	Yes
Number Of RPMs	1,
Current RPM Number	1,
RPM Value	1500, RPM
RPM Frequency Spacing	Linear
RPM Frequency Range Minimum	7, Hz
RPM Frequency Range Maximum	200, Hz
RPM Solution Intervals	193,
<b>Options</b>	
Solution Method	Mode Superposition
Include Residual Vector	No
Cluster Results	No
Skip Expansion	No
Store Results At All Frequencies	Yes
<b>Rotordynamics Controls</b>	
Coriolis Effect	Off
<b>Output Controls</b>	
Stress	Yes
Surface Stress	No
Back Stress	No
Strain	Yes
Contact Data	Yes
Nodal Forces	No

**Gambar 3. 23** Analysis Setting pada Hamonic response

Pada gambar 3.23 adalah analysis setting dimana diberikan rentang frekuensi 7-200 Hz. Dan diberikan juga input pada nilai RPM sebesar 1500 RPM, dengan rentang interval yang digunakan sebanyak 193 data hasil frekuensi dan amplitudo yang akan dihasilkan.





**Gambar 3. 24** Setup *Boundary Condition* yang digunakan dalam pengujian dinamis (a) *Harmonic response bumpy and sharp turn* (b) *Harmonic response Bumpy and sharp acceleration* (c) *Harmonic response bump acceleration and deceleration for turning*

Pada gambar 3.24 terlihat *boundary condition* dari tiap tiap kondisi kerja terhadap *battery pack*. Untuk gambar 3.24(a) terlihat *boundary condition* dari *battery pack* Ketika kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Untuk gambar 3.24(b) terlihat *boundary condition* dari *battery pack* Ketika kondisi jalan bergelombang dan berakselerasi yang dipercepat. Untuk gambar 3.24(c) terlihat *boundary condition* dari *battery pack* Kondisi benturan, akselerasi, deselerasi dan berbelok.

Terdapat tiga kondisi kerja yang digunakan pada pengujian dinamis:

1. Kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Ini untuk mensimulasikan keadaan statis *battery pack* Ketika mobil berbelok di persimpangan dalam kondisi jalan yang buruk. Menurut literatur dan keadaan sebenarnya dari *battery pack*, diputuskan untuk memberikan putaran pada mobil dengan percepatan 1 g, percepatan 1 g tegak lurus ke tanah ketika bergelombang, dan akselerasi gravitasi 1 g.
2. Kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat. Ini adalah salah satu kondisi paling umum saat mengemudi kendaraan, menurut literatur, diputuskan untuk memberi mobil 1 g percepatan ke depan, 1 g percepatan tegak lurus ke permukaan jalan, dan percepatan 1 g karena gravitasi.
3. Kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok. Saat mobil melambat dengan cepat, mobil dipercepat oleh 1 g dalam arah yang berlawanan, Ketika sentripetal percepatan 1 g saat berbelok, percepatan tegak lurus permukaan jalan sebesar 1 g. dan percepatan gravitasi 1 g.

Working condition	<i>x</i> acceleration [g]	<i>y</i> acceleration [g]	<i>z</i> acceleration [g]
Bumpy and sharp turns	1	0	2
Bumpy and sharp acceleration	0	1	2
Bump acceleration and deceleration for turning	1	-1	2

**Gambar 3. 25** Kondisi Kerja pemberian percepatan pada pengujian dinamis

### 3.2.5 Post Processing

Setelah melakukan uji simulasi statis dan dinamis pada *battery pack* maka selanjutnya akan dilakukan analisa data dan pembahasan sesuai teori yang ada. Dari analisa data dan pembahasan yang dilakukan dapat diketahui variable-variabel yang mempengaruhi deformasi dan stress yang terjadi pada *battery pack*. Hasil analisa dan pembahasan ini akan digunakan sebagai acuan untuk membuat kesimpulan dalam penelitian ini.

### 3.2.6 Kesimpulan

Setelah melakukan simulasi dan melakukan analisa data, maka dapat diperoleh kesimpulan dari penelitian tugas akhir ini. Kesimpulan yang ditulis merupakan pokok bahasan dan menjawab rumusan masalah yang telah dituliskan pada bab 1 sehingga tujuan dari penelitian dapat tercapai. Kemudian akan dilanjutkan penelitian lebih lanjut sehingga *battery pack* ini bisa terwujud dan digunakan oleh masyarakat banyak.

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada pembahasan bab 4 ini akan menjelaskan hasil dari analisa simulasi statis dan dinamis menggunakan *static structural* dan analisa dinamis menggunakan *harmonic analysis* pada *casing battery pack* dengan menggunakan dua material yang berbeda. Material yang digunakan adalah *structural steel* dan *alluminium alloy*. Pada analisa simulasi statis dan dinamis akan dijelaskan data yang didapatkan dari hasil simulasi serta pembahasan dari data yang didapatkan.

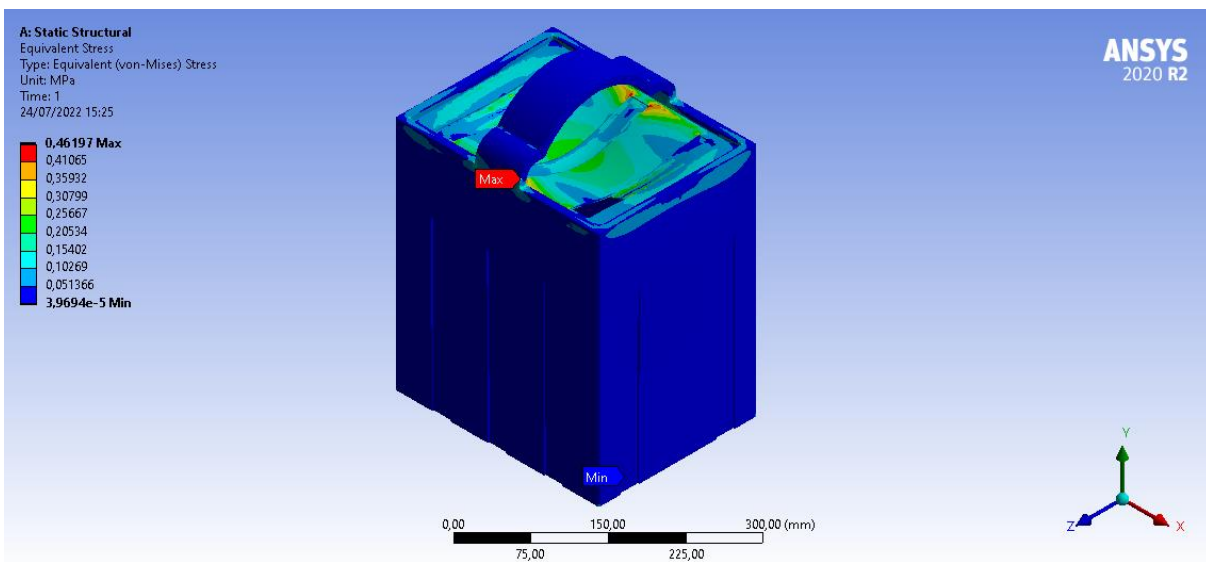
### 4.1 Hasil Static Structural

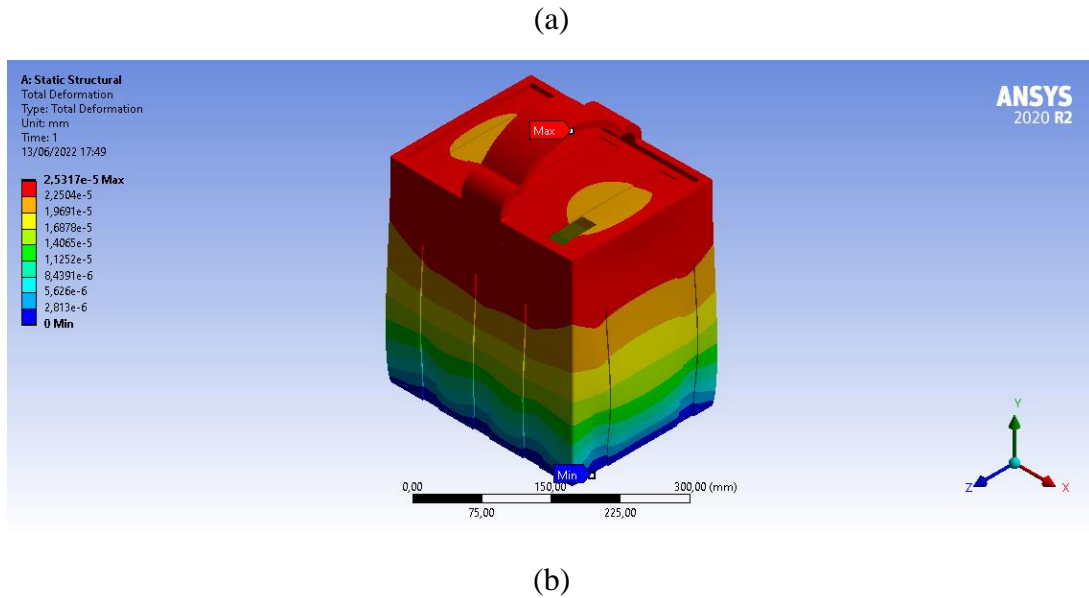
#### 4.1.1 Desain casing battery pack

Pada desain *casing battery pack* dilakukan pengujian statis dengan *static structural*. Penempatan titik beban dan *fix support* pada simulasi ini sesuai dengan pembahasan pada sub-bab 3.2.4.1.1 dan ukuran *meshing* yang disimulasikan yaitu 5 mm dimana ukuran ini sudah lulus uji konvergensi yang error nya sudah dibawah 5%. Pada simulasi desain *casing battery pack* ini menggunakan material *structural steel* dan *alluminium alloy*. Output yang akan didapatkan yaitu *Equivalent Von-Mises* dan *Total Deformation* yang terjadi.

#### 4.1.1.1 Hasil Equivalent Stress dan Total Deformation *casing battery pack* material Structural Steel

Hasil dari uji statis pada *casing battery pack* material *structural steel* didapatkan *equivalent stress* maksimum sebesar 0,46197 MPa, sehingga total deformasi maksimum yang didapatkan sebesar 0,000025317 mm. Titik tegangan maksimum yang terjadi terdapat pada bagian bawah *casing*, sedangkan untuk titik tegangan minimum terjadi pada bagian atas penutup *casing battery pack*. Kemudian untuk titik deformasi minimum terdapat pada penutup bagian atas *casing battery pack*, sedangkan untuk titik deformasi minimum terdapat pada bagian bawah *casing battery pack*. Pemusatan tegangan terjadi karena *casing battery pack* mengalami bending akibat distribusi gaya kearah sumbu Y negatif yang kemudian membuat stress maksimum terdapat pada bagian bawah casing. Hasil dari simulasi statis *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* dapat dilihat pada gambar 4.1a dan 4.1b.

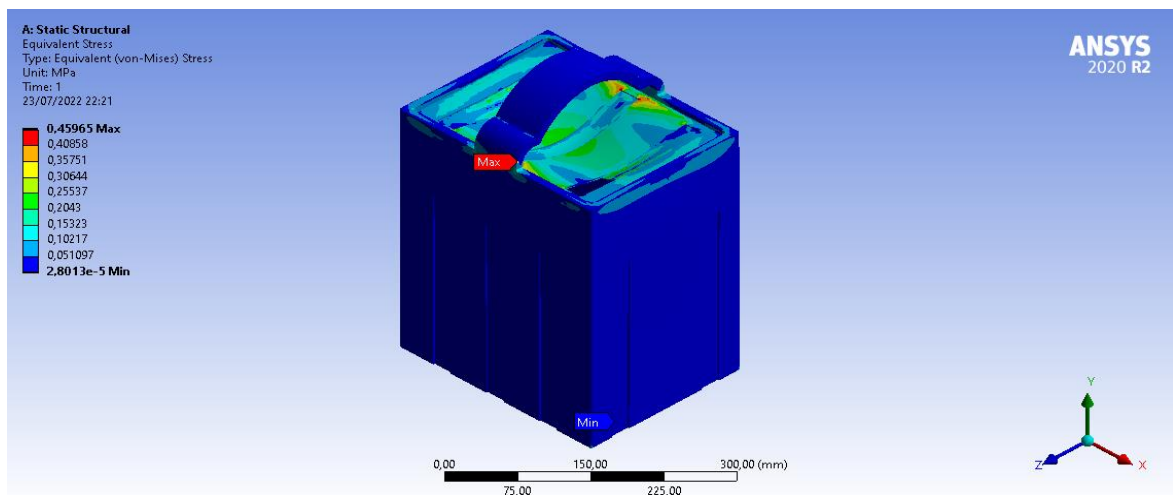




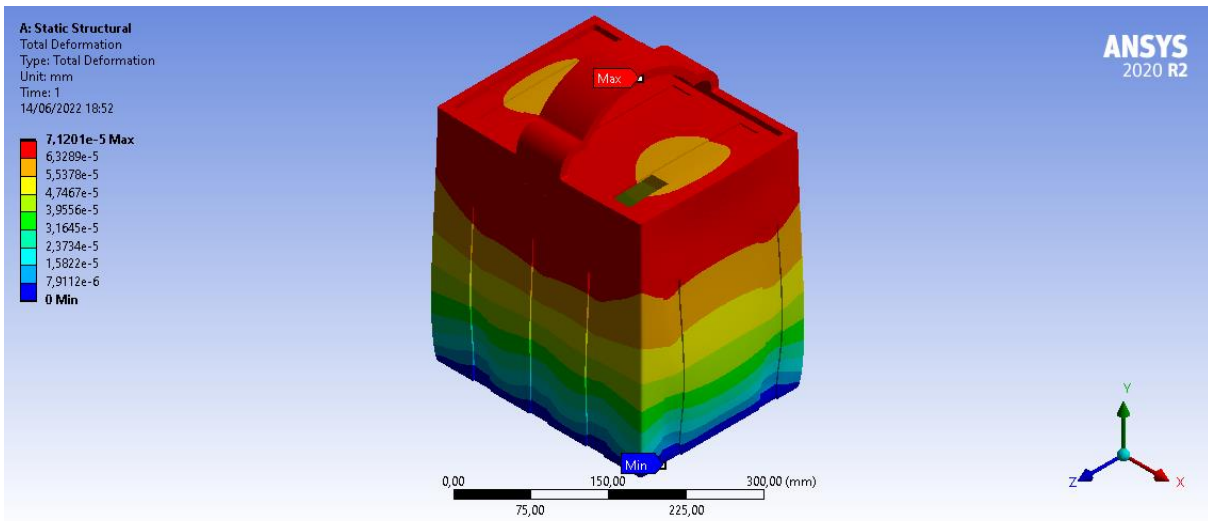
**Gambar 4. 1** Hasil uji *static structural casing battery pack material structural steel* (a) *Equivalent Stress* (b) *Total Deformasi*

#### 4.1.1.2 Hasil *Equivalent Stress* dan *Total Deformation casing battery pack material alluminium alloy*

Hasil dari uji statis pada *casing battery pack* menggunakan material *alluminium alloy* didapatkan *equivalent stress* maksimum sebesar 0,45965 MPa sehingga terdapat deformasi maksimum sebesar 0,000071201 mm. Titik tegangan maksimum terjadi pada bagian bawah *casing battery pack*, sedangkan untuk titik tegangan minimum terjadi pada bagian atas penutup *casing battery pack*. Kemudian untuk titik deformasi maksimum terjadi pada bagian atas penutup *casing battery pack*, sedangkan untuk titik deformasi minimum terjadi pada bagian bawah *casing battery pack*. Pemusatan tegangan ini terjadi karena *casing battery pack* mengalami *bending* akibat distribusi gaya kearah sumbu Y negatif yang kemudian membuat stress maksimum terdapat pada bagian bawah *casing battery pack*. Hasil dari simulasi statis *casing battery pack* dengan menggunakan material *alluminium alloy* dapat dilihat pada gambar 4.2a dan 4.2b.



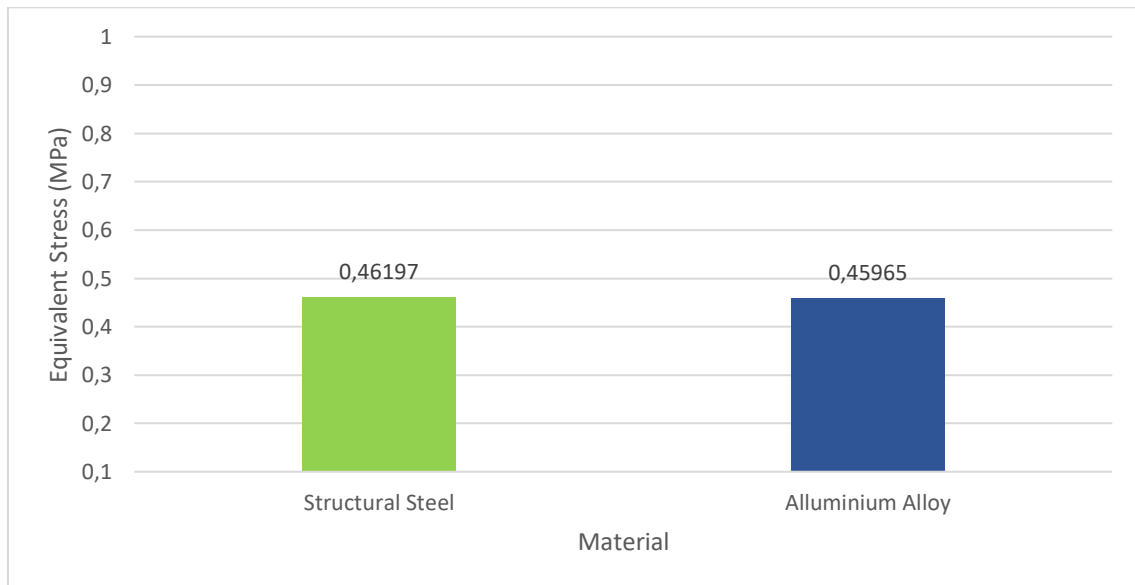
(a)



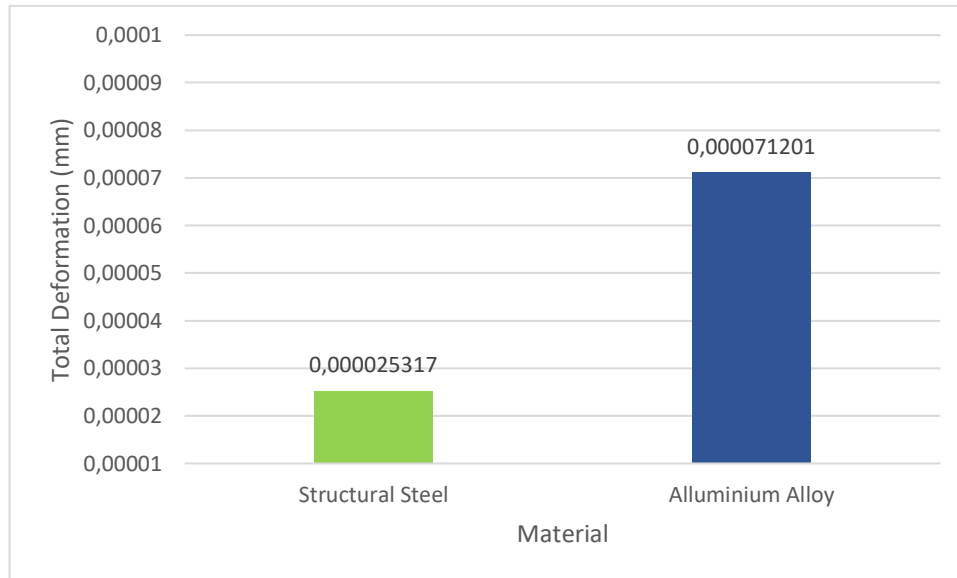
(b)

**Gambar 4. 2** Hasil uji *static structural casing battery pack material alluminium alloy* (a) *Equivalent Stress* (b) *Total Deformation*

#### 4.1.2 Analisis Data Simulasi Statis



**Gambar 4. 3** Grafik perbandingan *Stress Material Structural Steel* dan *Alluminium Alloy*



**Gambar 4. 4** Grafik Perbandingan *Total Deformation* Material *Structural Steel* dan *Alluminium Alloy*

Dari grafik gambar 4.3 dapat dilihat perbandingan *stress* yang terjadi antara dua material yang berbeda. Material yang digunakan disini adalah *Structural Steel* dan *Alluminium Alloy*. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa *stress* yang terjadi pada *alluminium alloy* lebih kecil dibandingkan dengan *stress* yang dihasilkan oleh material *structural steel*. Dengan *stress* maksimum yang didapat pada material *Structural Steel* sebesar 0,46197 dan untuk material *Alluminium Alloy* sebesar 0,45965. Ini terjadi karena kekakuan yang dimiliki oleh material *structural steel* lebih besar dibandingkan dengan kekakuan yang dimiliki oleh material *alluminium alloy*. Sedangkan untuk grafik gambar 4.4 deformasi maksimum yang dihasilkan berbeda jauh antara material *Structural Steel* dan *Alluminium Alloy*. Untuk material *Structural Steel* sebesar 0,000025317 mm dan untuk material *Alluminium Alloy* sebesar 0,000071201. Ini terjadi karena kekakuan yang dimiliki oleh material *structural steel* lebih besar dibandingkan dengan kekakuan yang dimiliki oleh material *alluminium alloy* sehingga material *alluminium alloy* lebih mudah mengalami deformasi.

Hasil dari uji *Static Structural* pada kedua material *casing battery pack* masih sangat aman karena nilai *equivalent stress* yang terjadi masih dibawah *yield strength* dari material yang digunakan. Selain itu, nilai *safety factor* pada material *structural steel* dan *alluminium alloy* masih aman karena memiliki nilai *safety factor* diatas 1. Jadi untuk *casing battery pack* material *structural steel* dan *alluminium alloy* tidak akan mengalami kerusakan jika hanya dianalisa dengan analisa statis.

#### 4.2 Modal Analisis

Simulasi analisa modal dilakukan untuk mengetahui frekuensi natural dan *mode shape* dari model yang dianalisa sehingga simulasi tersebut dapat dilanjutkan ke simulasi *harmonic analysis*. Pada analisa modal, akan didapatkan 15 *mode shape* dan frekuensi natural dari masing-masing material yang akan disimulasikan. Frekuensi natural perlu diketahui untuk menghindari terjadinya resonansi dimana frekuensi natural dari material yang digunakan nilainya sama dengan frekuensi eksitasi yang dapat menyebabkan kerusakan pada *casing battery pack*.



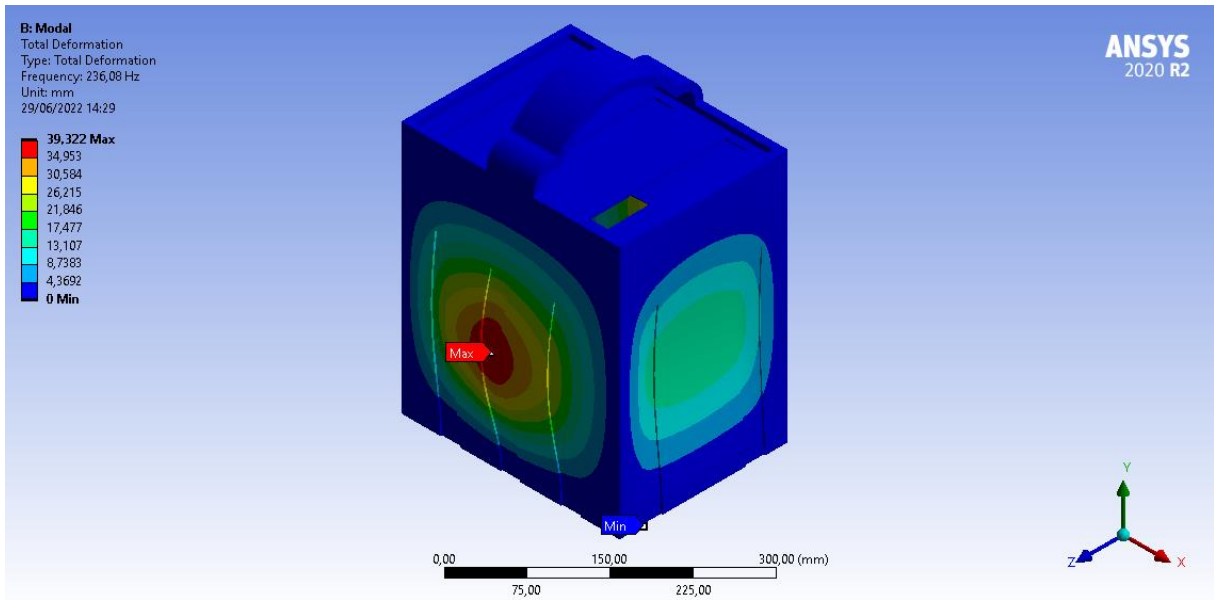
#### 4.2.1 Frekuensi Natural Material Structural Steel

Hasil dari analisa modal yang dilakukan pada material *structural steel casing battery pack* didapatkan *mode shape* yang dapat dilihat pada tabel 4.1 sebagai berikut.

**Tabel 4. 1** Frekuensi *Mode shape* material *structural steel*

Mode Shape	Frekuensi Natural (Hz)
1	236,08
2	247,33
3	297,34
4	344,37
5	411,08
6	465,19
7	493,76
8	540,82
9	547,26
10	579,82
11	587,09
12	610,34
13	693,4
14	705,18
15	721,49

Dari tabel 4.1 dapat dilihat frekuensi natural dan *mode shape* yang didapat dari simulasi analisa modal. Diketahui dari tabel jika frekuensi natural dari material *structural steel* sebesar 236,08 Hz pada *mode shape* pertama, dan sebesar 721,49 Hz pada *mode shape* ke lima belas. Nilai dari frekuensi eksitasi yang bekerja pada *casing battery pack* masih sangat jauh dibawah frekuensi natural yang disimulasikan. Frekuensi operasional dari *E-Scooter* yang digunakan maksimum berada di 25 Hz atau 1500 RPM. Berikut merupakan *mode shape* pertama pada material *structural steel*.



**Gambar 4. 5** *Mode Shape* pertama pada material *Structural Steel*

#### 4.2.2 Frekuensi Natural Material Aluminium Alloy

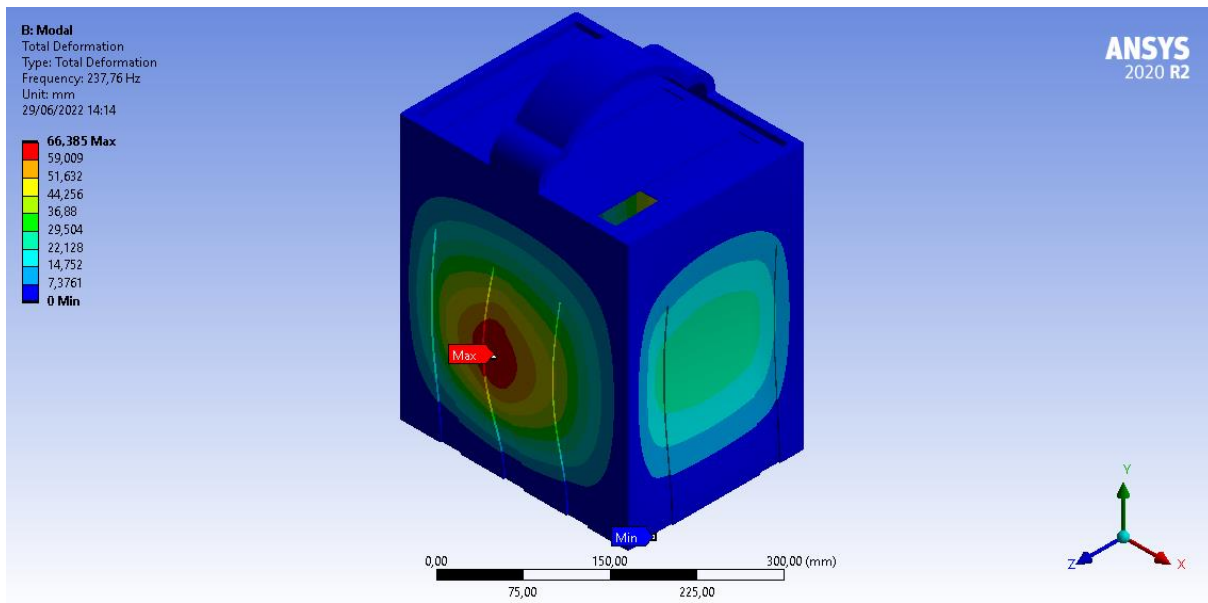
Hasil dari analisa modal yang dilakukan pada material *aluminium alloy casing battery pack* didapatkan *mode shape* yang dapat dilihat pada tabel 4.2 sebagai berikut.

**Tabel 4. 2** Frekuensi *Mode Shape* material *aluminium alloy*

Mode Shape	Frekuensi Natural (Hz)
1	237,76
2	249,01
3	299,89
4	348,33
5	412,91
6	469,69
7	498,62
8	545,28
9	552,35
10	585,95
11	589,7
12	617,41
13	701,86
14	705,3
15	725,58

Dari tabel 4.2 dapat dilihat bahwa frekuensi natural dan *mode shape* dari simulasi analisa modal. Dapat dilihat frekuensi natural di tiap mode shape material *aluminium alloy* tidak jauh berbeda dibandingkan dengan *structural steel*. Untuk *mode shape* pertama pada material *aluminium alloy* mempunyai frekuensi natural sebesar 237,76 Hz, dan untuk *mode shape* ke lima belas memiliki frekuensi natural sebesar 725,58 Hz. Nilai frekuensi eksitasi yang

bekerja pada *casing battery pack* masih sangat jauh dibawah frekuensi natural yang disimulasikan. Frekuensi operasional dari *E-Scooter* yang digunakan maksimum berada di 25 Hz atau 1500 RPM. Berikut merupakan *mode shape* pertama pada material *aluminium alloy*.



**Gambar 4. 6** *Mode Shape* pertama material *aluminium alloy*

### 4.3 Pengujian Dinamis

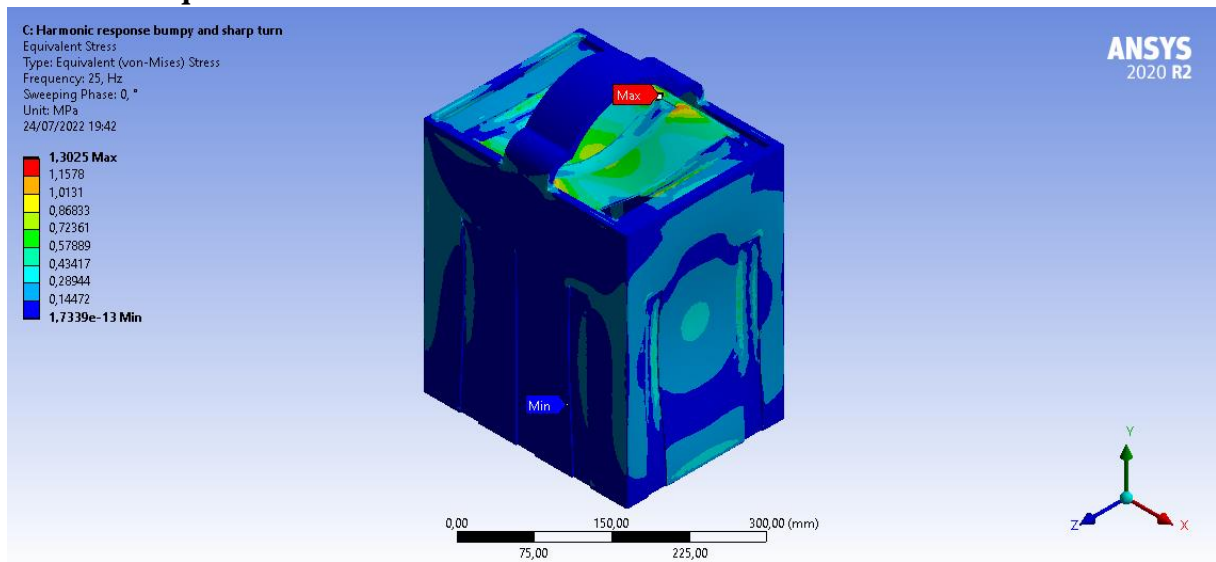
Dari analisa modal kemudian dapat dilanjutkan ke pengujian dinamis dengan menggunakan analisa harmonik. Simulasi ini akan digunakan untuk mengetahui karakteristik dinamis dari masing-masing material Ketika diberikan beban harmonik. Hasil yang didapat dari pengujian *harmonic analysis* ini adalah *equivalent stress*, *directional deformation*, dan respon dinamis dari masing-masing material. Dari simulasi didapatkan hasil seperti berikut.

#### 4.3.1 Harmonic Analysis

##### 4.3.1.1 Kondisi Jalan Bergelombang dan Berbelok Tajam

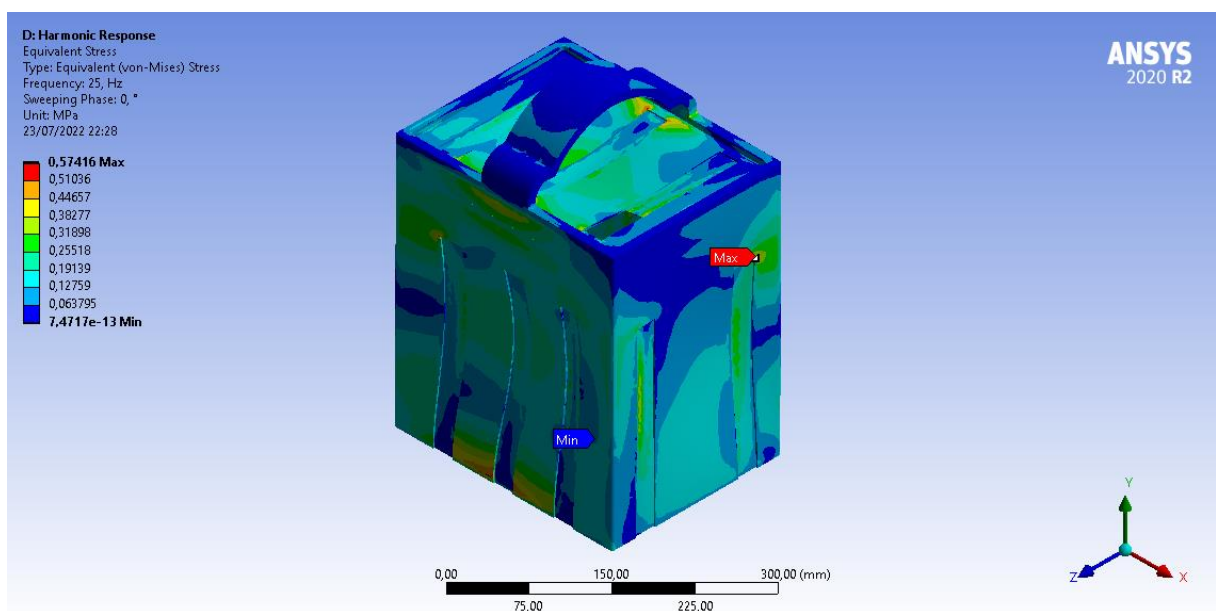
Pengujian ini dilakukan untuk mensimulasikan keadaan dinamis *battery pack* ketika mobil berbelok di persimpangan dalam kondisi jalan yang buruk. Menurut literatur dan keadaan sebenarnya dari *battery pack*, diputuskan untuk memberikan putaran pada mobil dengan percepatan 1 g, percepatan 1 g tegak lurus ke tanah ketika bergelombang, dan akselerasi gravitasi 1 g. Sehingga nanti akan diinput percepatan sebesar  $9810 \text{ mm/s}^2$  pada sumbu x,  $19620 \text{ mm/s}^2$  pada sumbu y dan  $0 \text{ mm/s}^2$  pada sumbu z. Berikut adalah hasil dari simulasi yang berupa *equivalent stress*, *directional deformation*, dan respon dinamis.

#### 4.3.1.1.1 Equivalent Stress



**Gambar 4. 7** *Equivalent Stress casing battery pack* dengan material *Structural steel* pada kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam

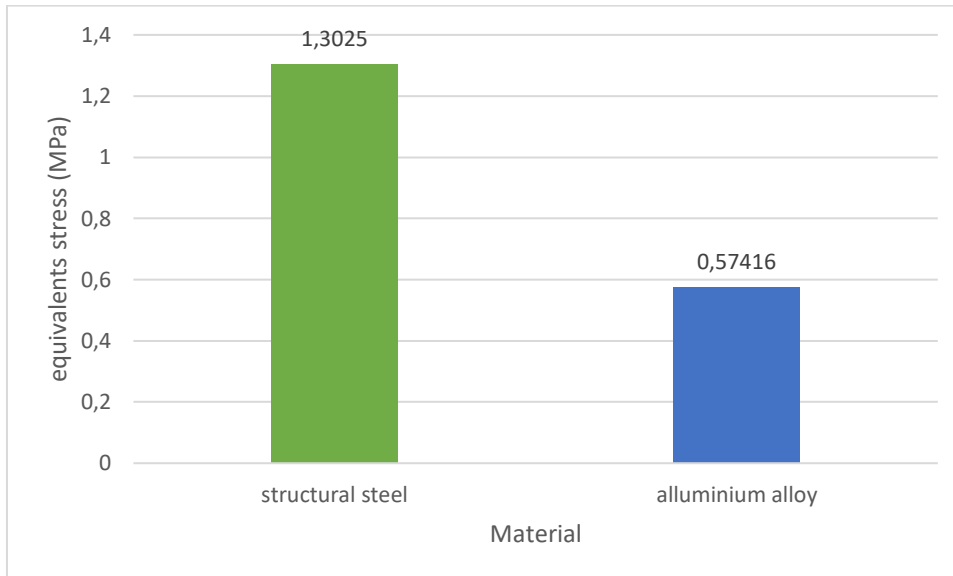
Pada gambar 4.7 merupakan *equivalent stress* pada *casing battery pack* material *structural steel*. Dapat dilihat stress maksimum terdapat pada bagian kanan sisi *casing battery pack* atau searah dengan sumbu x. *Stress* maksimum yang terjadi disini sebesar 1,3025 MPa dimana nilai *stress* ini masih jauh dari nilai *yield strength* dari material *structural steel* sebesar 250 MPa.



**Gambar 4. 8** *Equivalent stress casing battery pack* dengan material *Alluminium Alloy* pada kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam.

Pada gambar 4.8 merupakan *equivalent stress* pada *casing battery pack* material *Alluminium Alloy* pada kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Dapat dilihat *stress* maksimum terdapat pada bagian kanan sisi *casing battery pack* atau searah dengan sumbu x.

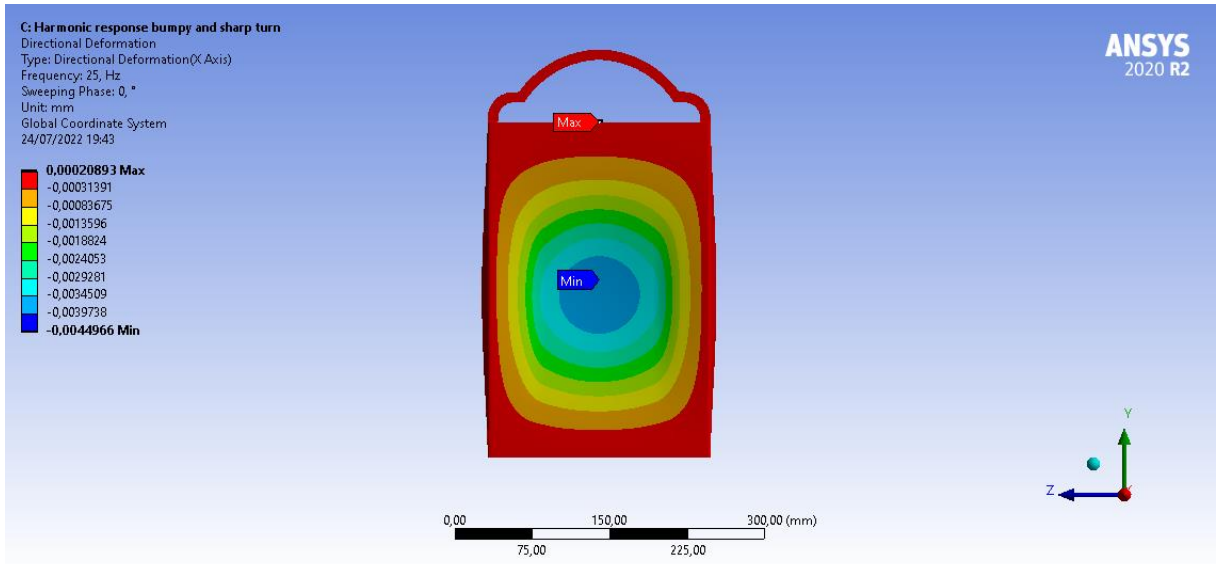
Stress maksimum yang terjadi disini sebesar 0,57416 MPa dimana nilai *stress* ini masih jauh dari nilai *yield strength* dari material *structural steel* sebesar 250 MPa.



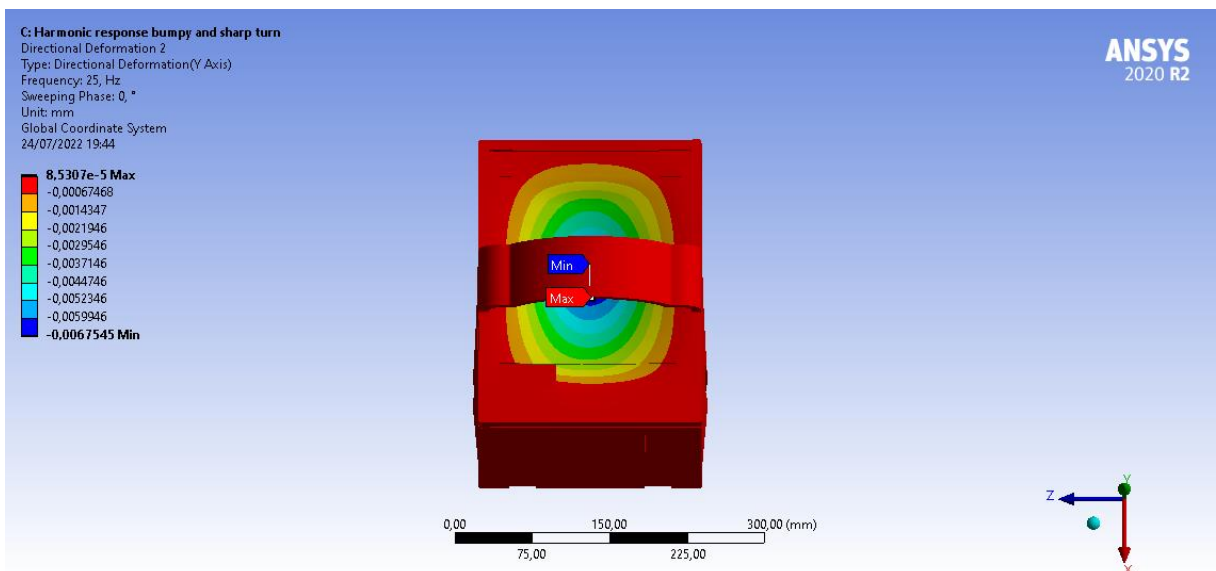
**Gambar 4. 9** Grafik perbandingan *stress casing battery pack* material *structural steel* dan *alluminium alloy* pada sumbu x pada kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam.

Pada gambar 4.9 terdapat gambar grafik bar yang menunjukkan perbandingan antara stress maksimum pada kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam yang didapat oleh *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* dan material *aluminium alloy*. Untuk stress maksimum yang dihasilkan pada *casing battery pack* dengan material *structural steel* adalah sebesar 1,3025 MPa. Sedangkan stress maksimum yang dihasilkan pada *casing battery pack* dengan menggunakan material *aluminium alloy* adalah sebesar 0,57416 MPa. Stress maksimum dari *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* lebih besar dibandingkan dengan menggunakan material *aluminium alloy*. Hal ini dikarenakan kekakuan yang dimiliki material *structural steel* ini lebih besar dibandingkan dengan material *aluminium alloy*. Sehingga stress yang dihasilkan oleh *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* lebih besar dibandingkan dengan material *aluminium alloy*.

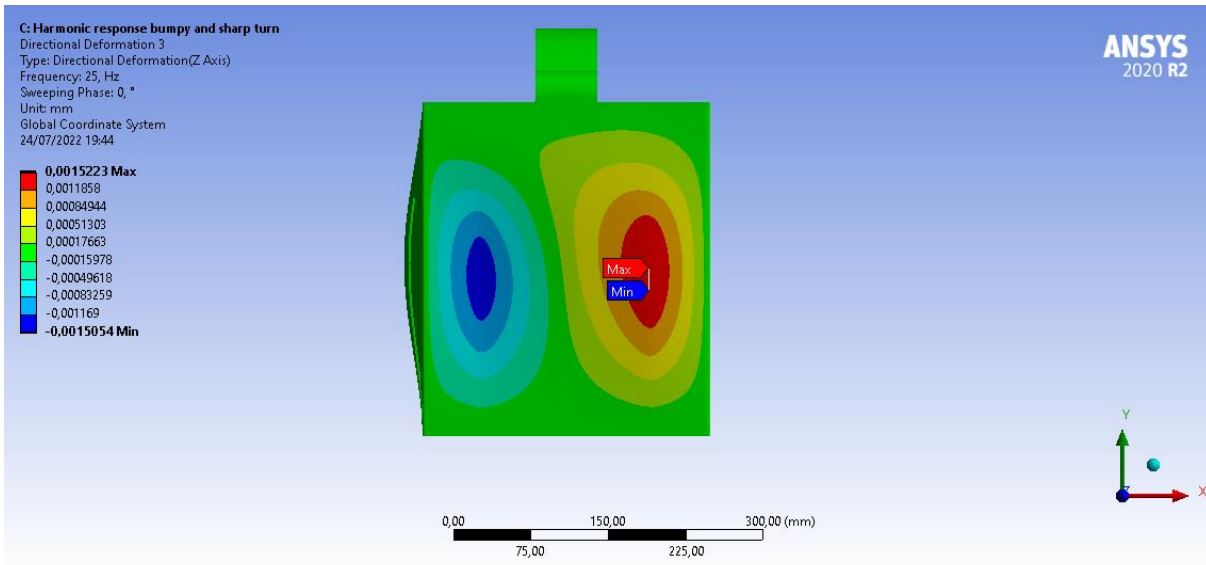
### 4.3.1.1.2 Directional Deformation



(a)



(b)



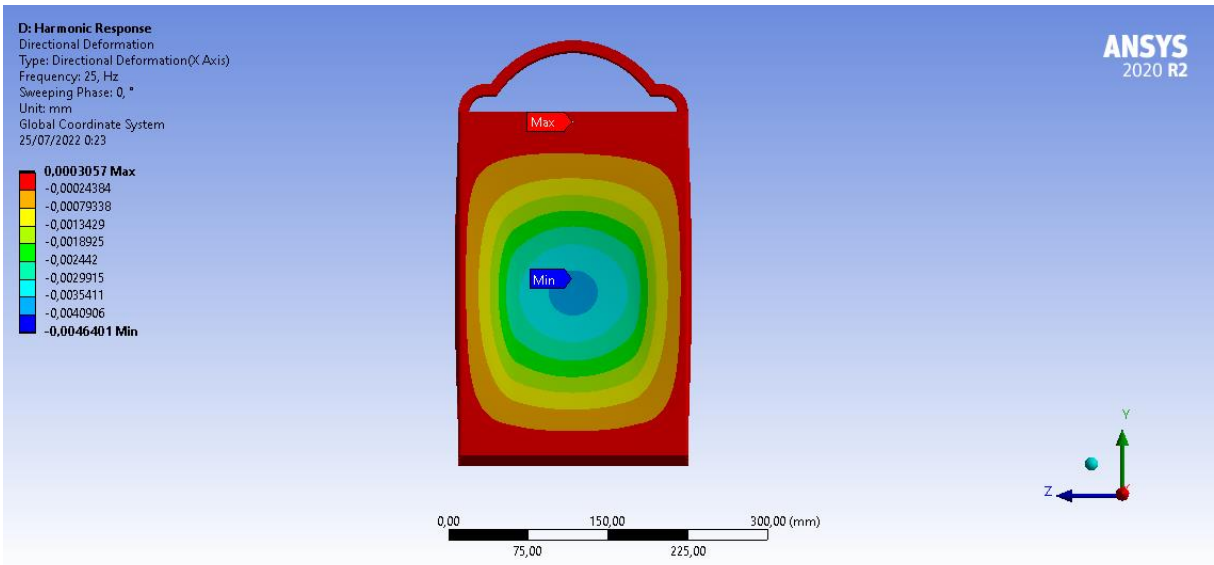
( c )

**Gambar 4. 10** *Directional deformation* pada kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam dengan material *structural steel* dilihat dari sumbu (a) x (b) y (c) z.

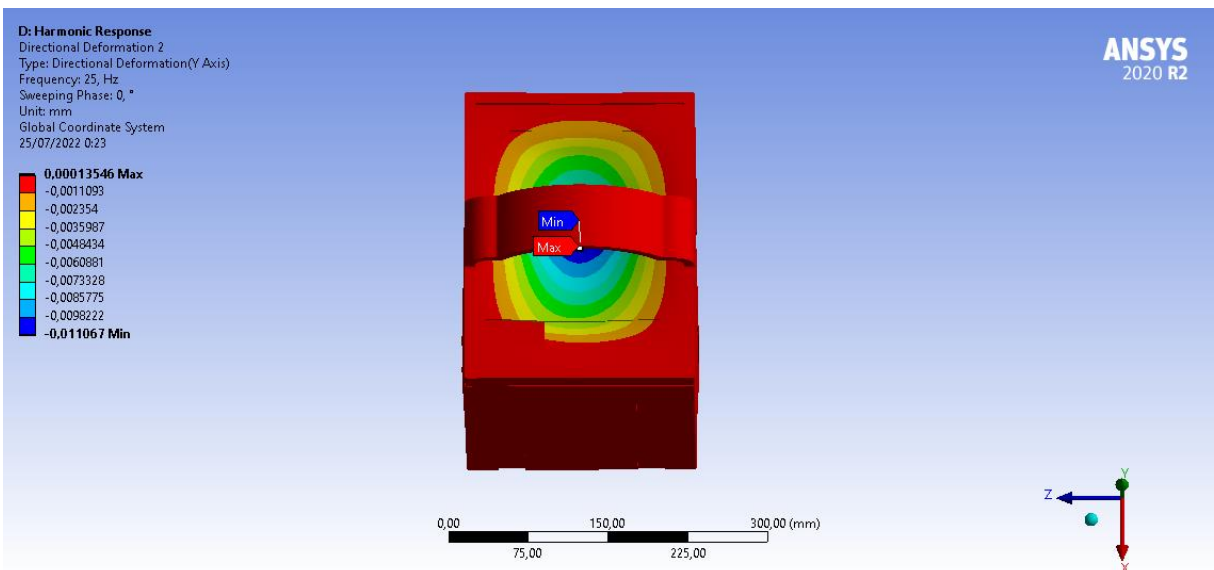
Pada gambar 4.10 menunjukkan *directional deformation* dengan menggunakan material *structural steel* dari beberapa sumbu. Untuk 4.10(a) merupakan *directional deformation* pada sumbu x dengan deformasi maksimum sebesar 0,00020893 mm. Dapat dilihat deformasi maksimum terdapat pada sekeliling *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu x, sementara deformasi minimumnya dapat dilihat pada tengah ketika kita menghadap ke sumbu x.

Untuk gambar 4.10(b) merupakan *directional deformation* pada sumbu y dengan deformasi maksimum sebesar 0,000085307 mm. Dapat dilihat bahwa bagian yang berwarna merah adalah dimana letak deformasi maksimum yang terdapat pada sekeliling *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu y sementara pada bagian yang berwarna biru adalah deformasi minimumnya. Dapat dilihat deformasi minimum terletak pada bagian tengah ketika kita menghadap ke sumbu y.

Dan untuk gambar 4.10(c) merupakan *directional deformation* pada sumbu z dengan deformasi maksimum sebesar 0,0015223 mm. Pada bagian yang berwarna merah adalah letak deformasi maksimum, dimana deformasi maksimum yang terjadi terdapat pada bagian kanan *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu z. Sementara untuk bagian yang berwarna biru adalah letak deformasi minimum dimana deformasi minimum yang terjadi terdapat pada bagian kiri ketika kita menghadap ke sumbu z.

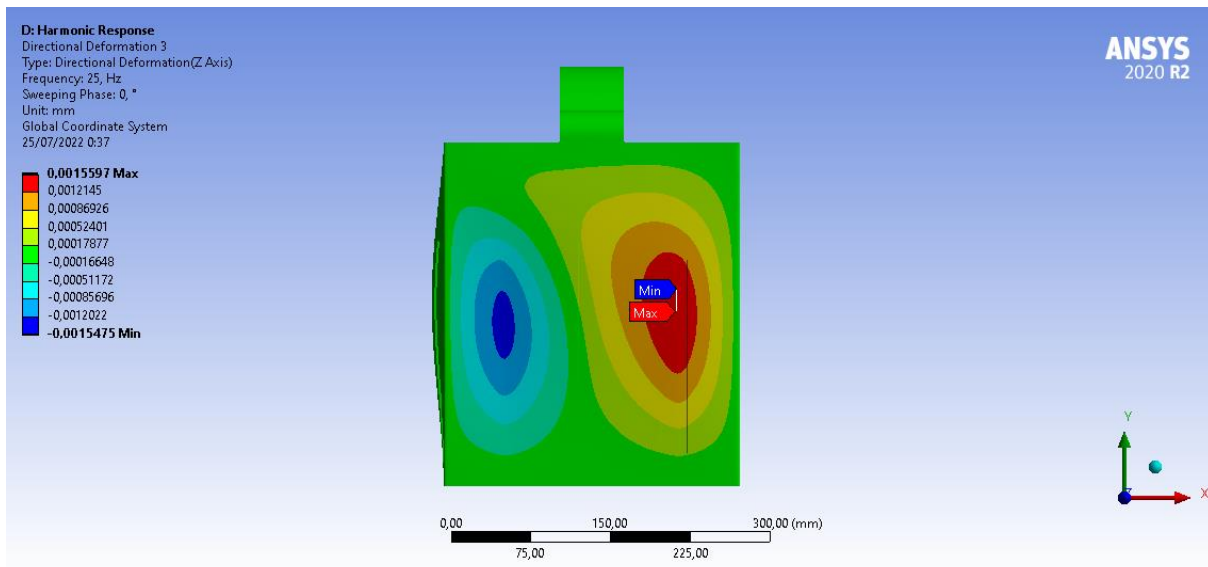


(a)



(b)





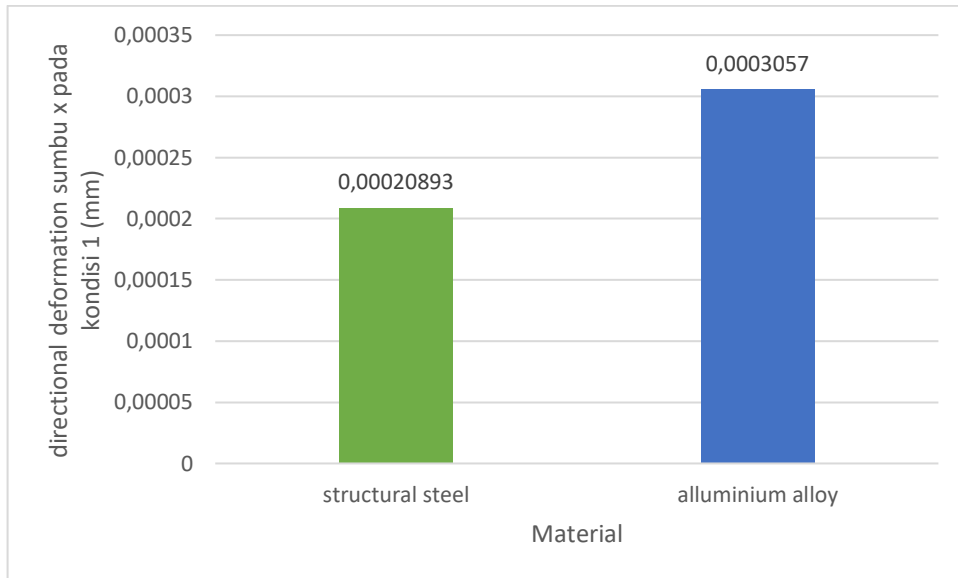
( c )

**Gambar 4. 11** *Directional deformation casing battery pack* dengan material *alluminium alloy* pada kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam pada sumbu (a) x (b) y (c) z.

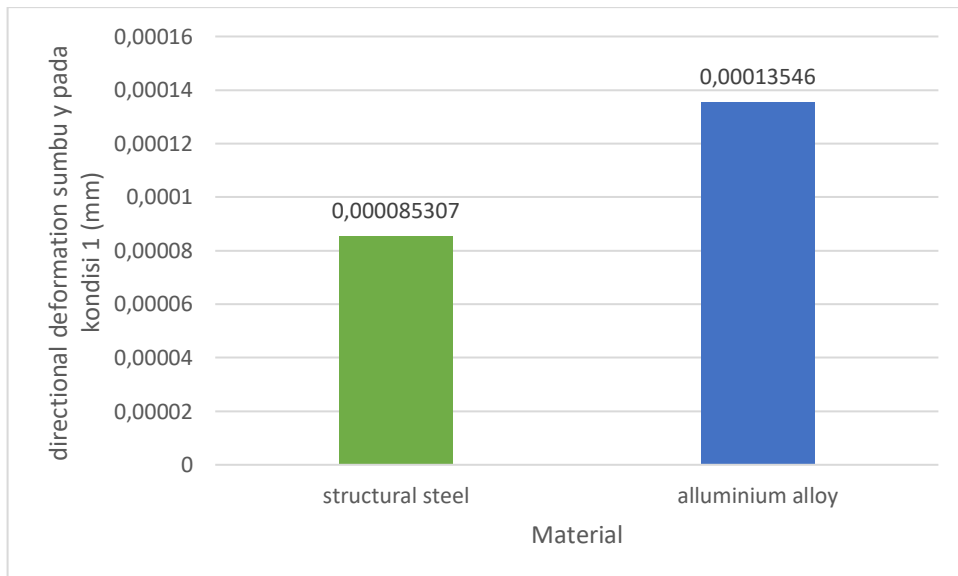
Pada gambar 4.11 menunjukkan *directional deformation* dengan menggunakan material *alluminium alloy* dari beberapa sumbu. Untuk 4.10(a) merupakan *directional deformation* pada sumbu x dengan deformasi maksimum sebesar 0,0003057 mm. Dapat dilihat deformasi maksimum terdapat pada sekeliling *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu x, sementara deformasi minimumnya dapat dilihat pada tengah ketika kita menghadap ke sumbu x.

Untuk gambar 4.11(b) merupakan *directional deformation* pada sumbu y dengan deformasi maksimum sebesar 0,00013546 mm. Dapat dilihat bahwa bagian yang berwarna merah adalah dimana letak deformasi maksimum yang terdapat pada sekeliling *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu y sementara pada bagian yang berwarna biru adalah deformasi minimumnya. Dapat dilihat deformasi minimum terletak pada bagian tengah ketika kita menghadap ke sumbu y.

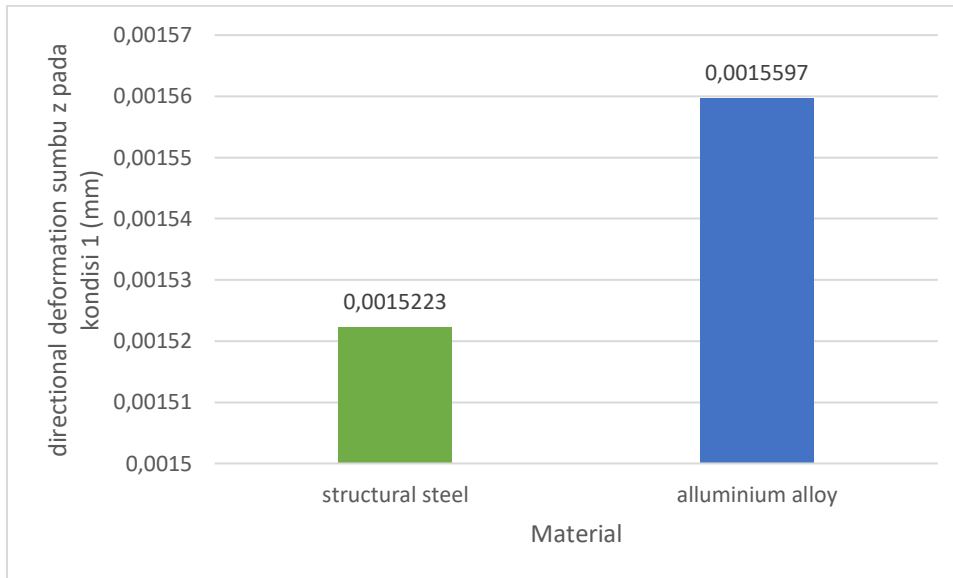
Dan untuk gambar 4.11(c) merupakan *directional deformation* pada sumbu z dengan deformasi maksimum sebesar 0,0015597 mm. Pada bagian yang berwarna merah adalah letak deformasi maksimum, dimana deformasi maksimum yang terjadi terdapat pada bagian kanan *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu z. Sementara untuk bagian yang berwarna biru adalah letak deformasi minimum dimana deformasi minimum yang terjadi terdapat pada bagian kiri ketika kita menghadap ke sumbu z.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 4. 12** grafik perbandingan *directional deformation* pada sumbu x, y, dan z pada *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* dan *aluminium alloy* pada kondisi 1.

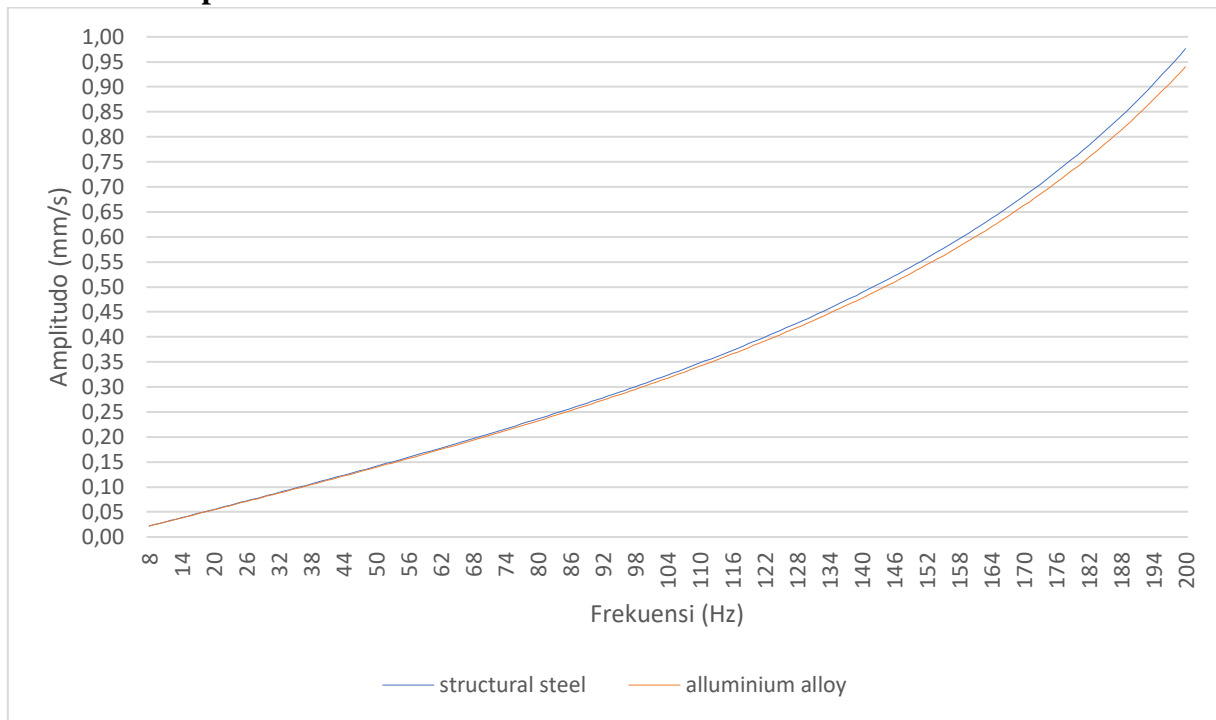
Pada gambar grafik 4.12 terlihat perbandingan *directional deformation* pada sumbu x, y, dan z yang dihasilkan *casing battery pack* dengan menggunakan dua variasi material yaitu *structural steel* dan *aluminium alloy*. Untuk gambar 4.12(a) merupakan *directional deformation* pada sumbu x saat terjadinya kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Dapat dilihat *directional deformation* pada material *structural steel* sebesar 0,00020893 mm dan pada material *aluminium alloy* sebesar 0,0003057 mm.

Untuk gambar 4.12(b) merupakan *directional deformation* pada sumbu y saat terjadinya kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Dapat dilihat *directional deformation* pada material *structural steel* di sumbu y sebesar 0,000085307 mm dan pada material *aluminium alloy* sebesar 0,00013546 mm.

Untuk gambar 4.12(c) merupakan *directional deformation* pada sumbu z saat terjadinya kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Dapat dilihat *directional deformation* pada material *structural steel* di sumbu z sebesar 0,0015223 mm dan pada material *aluminium alloy* sebesar 0,0015597 mm.

Dapat disimpulkan dari ketiga *directional deformation* pada sumbu x, y, dan z saat kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam untuk *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* mempunyai deformasi yang lebih kecil dibandingkan dengan material *aluminium alloy*. Hal ini dikarenakan *yield strength* dari material *aluminium alloy* lebih besar dibandingkan dengan *yield strength* dari material *structural steel*, sehingga material *aluminium alloy* lebih mudah berdeformasi dibandingkan dengan material *structural steel*.

#### 4.3.1.1.3 Respon Dinamis



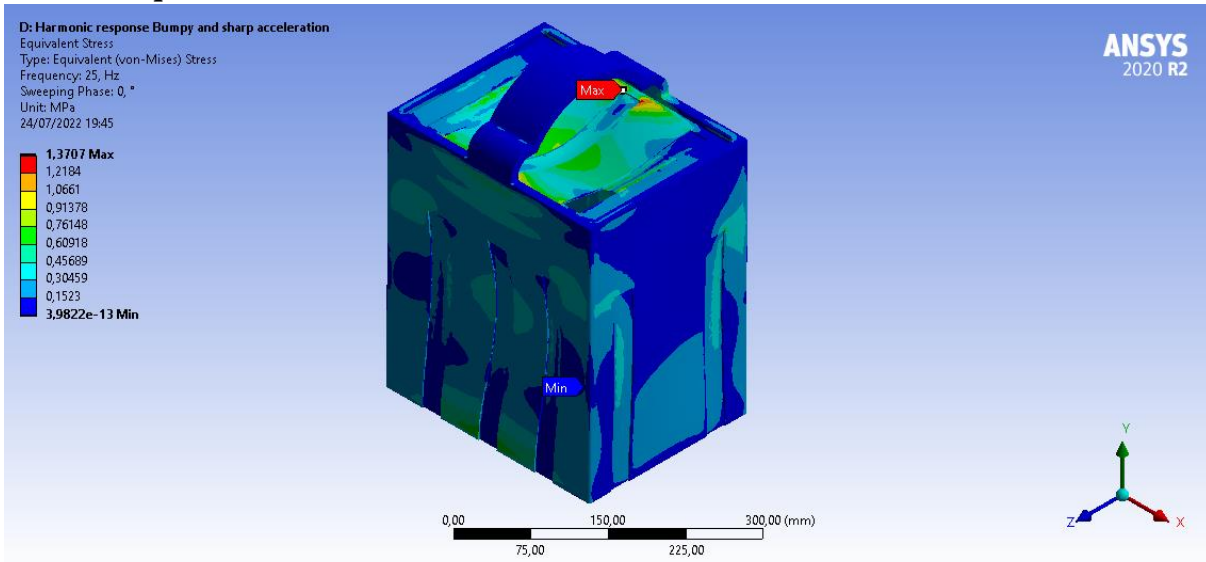
**Gambar 4. 13** Grafik perbandingan material di kondisi 1

Pada gambar 4.13 menunjukkan grafik perbandingan amplitudo yang dihasilkan dengan frekuensi tertentu pada kondisi 1 yang terjadi pada *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* dan *aluminium alloy*. Dapat dilihat pada gambar 4.13 merupakan grafik perbandingan material tersebut pada kondisi 1. Untuk material *structural steel* amplitudo terendah dihasilkan sebesar 0,022 mm/s pada frekuensi 8 Hz dan tertinggi sebesar 0,97638 mm/s pada frekuensi 200 Hz. Sedangkan untuk material *aluminium alloy* amplitudo terendah dihasilkan sebesar 0,021683 mm/s pada frekuensi 8 Hz dan tertinggi sebesar 0,94012 mm/s pada frekuensi 200 Hz. Dapat dilihat disini amplitudo yang dihasilkan oleh *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* lebih besar dibandingkan dengan menggunakan material *aluminium alloy*. Hal ini dikarenakan material *structural steel* mempunyai sifat kekakuan yang lebih besar dibandingkan dengan material *aluminium alloy* sehingga menimbulkan getaran yang lebih besar.

#### 4.3.1.2 Kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat

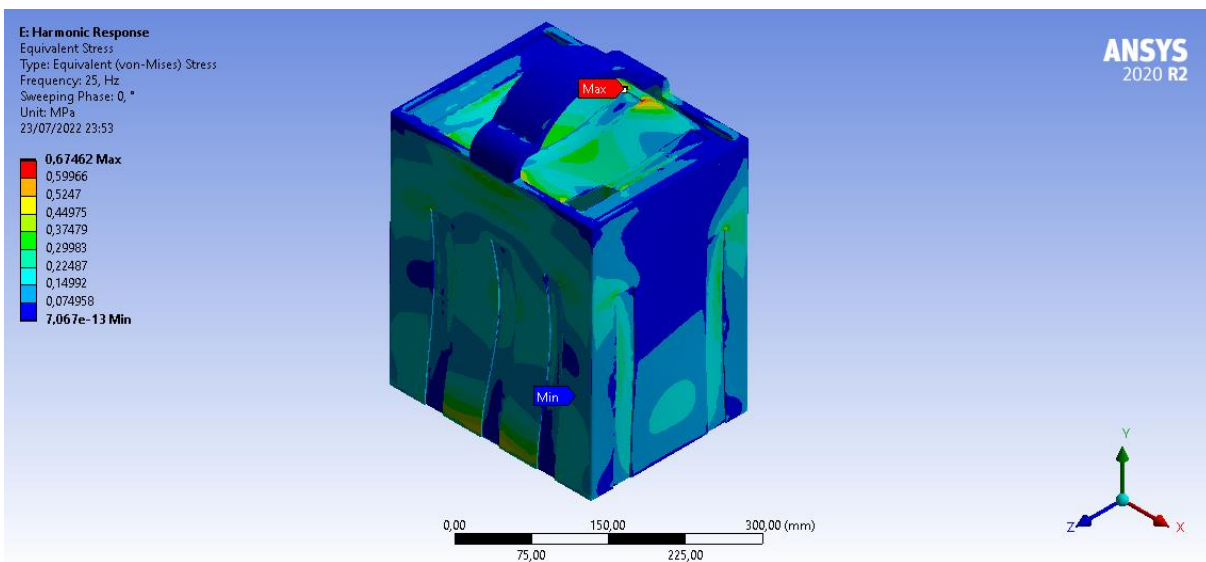
Kondisi ini adalah salah satu kondisi paling umum saat mengemudi kendaraan, menurut literatur, diputuskan untuk memberi mobil 1 g percepatan ke depan, 1 g percepatan tegak lurus ke permukaan jalan, dan percepatan 1 g karena gravitasi. . Sehingga nanti akan diinput percepatan sebesar 0 mm/s<sup>2</sup> pada sumbu x, 19620 mm/s<sup>2</sup> pada sumbu y dan 9810 mm/s<sup>2</sup> pada sumbu z. Berikut adalah hasil dari simulasi yang berupa *equivalent stress*, *directional deformation*, dan respon dinamis.

### 4.3.1.2.1 Equivalent stress



**Gambar 4. 14** *Equivalent Stress casing battery pack dengan material structural steel pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat.*

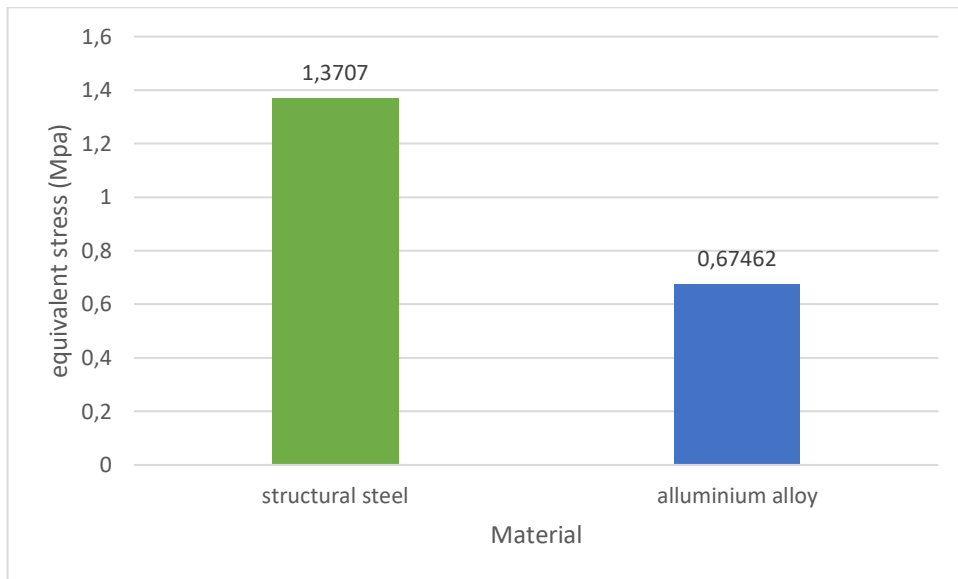
Pada gambar 4.14 merupakan *equivalent stress* pada *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat. Dapat dilihat *stress* maksimum terdapat pada bagian kanan sisi *casing battery pack* atau searah dengan sumbu x. *Stress* maksimum yang terjadi disini sebesar 1,3707 MPa dimana nilai *stress* ini masih jauh dari nilai *yield strength* dari material *structural steel* sebesar 250 MPa.



**Gambar 4. 15** *Equivalent Stress casing battery pack dengan material aluminium alloy pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat.*

Pada gambar 4.15 merupakan *equivalent stress* pada *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat. Dapat dilihat *stress* maksimum terdapat pada bagian kanan sisi *casing battery pack*

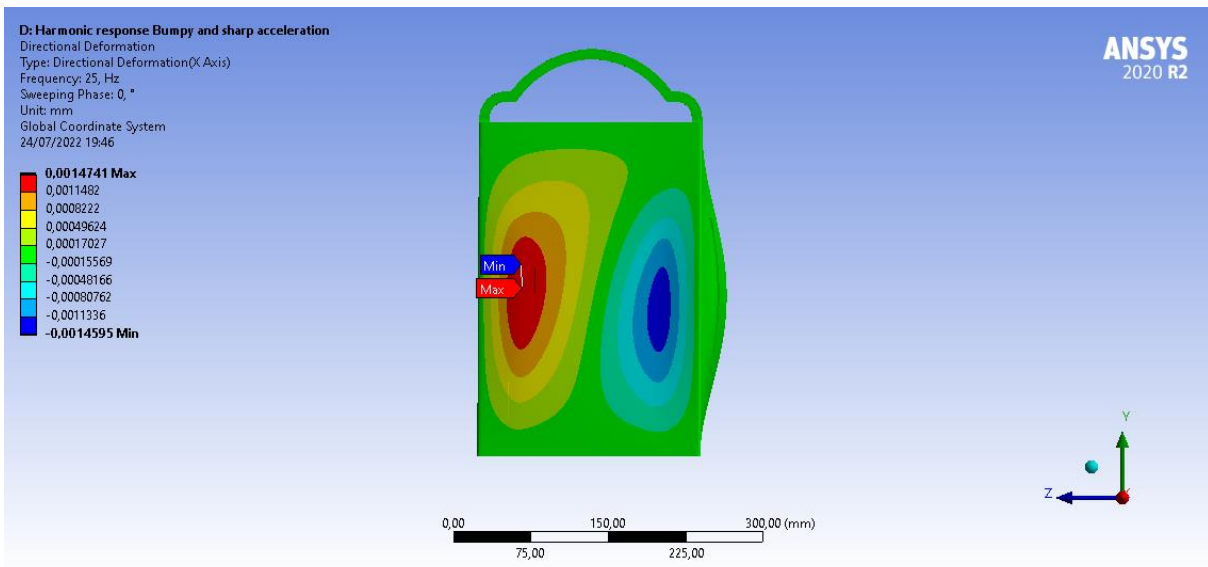
atau searah dengan sumbu x. *Stress* maksimum yang terjadi disini sebesar 0,67462 MPa dimana nilai *stress* ini masih jauh dari nilai *yield strength* dari material *structural steel* sebesar 250 MPa.



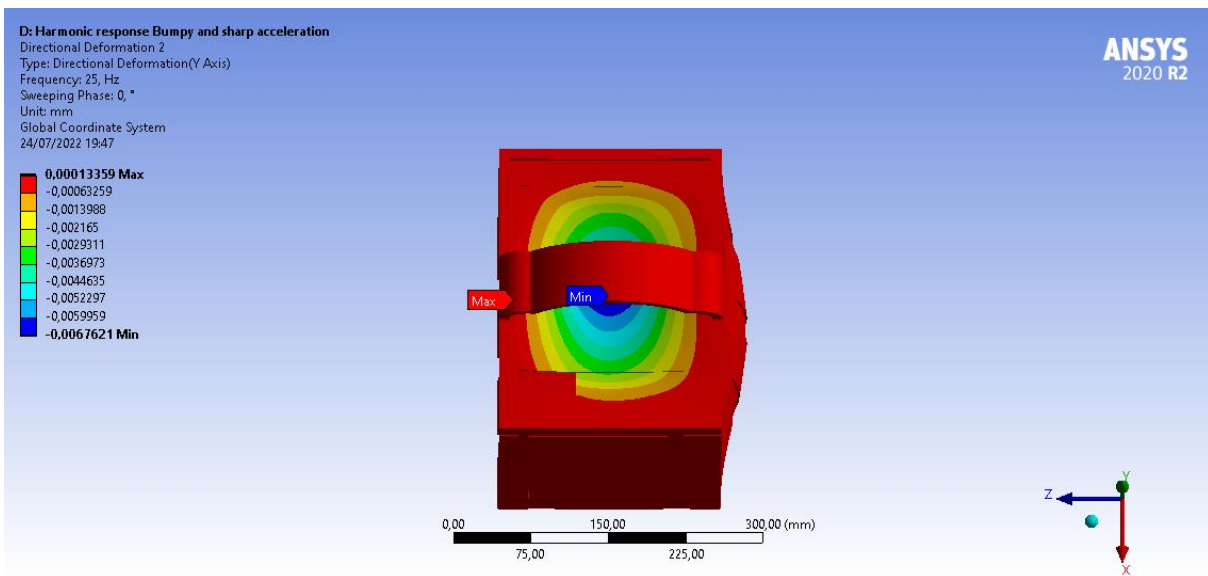
**Gambar 4. 16** Grafik perbandingan *stress casing battery pack* material *structural steel* dan *aluminium alloy* pada sumbu x pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat.

Pada gambar 4.16 terdapat gambar grafik bar yang menunjukkan perbandingan antara stress maksimum pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat yang didapat oleh *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* dan material *aluminium alloy*. Untuk stress maksimum yang dihasilkan pada *casing battery pack* dengan material *structural steel* adalah sebesar 1,3707 MPa. Sedangkan stress maksimum yang dihasilkan pada *casing battery pack* dengan menggunakan material *aluminium alloy* adalah sebesar 0,67462 MPa. Stress maksimum dari *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* lebih besar dibandingkan dengan menggunakan material *aluminium alloy*. Hal ini dikarenakan kekakuan yang dimiliki material *structural steel* ini lebih besar dibandingkan dengan material *aluminium alloy*. Sehingga stress yang dihasilkan oleh *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* lebih besar dibandingkan dengan material *aluminium alloy*.

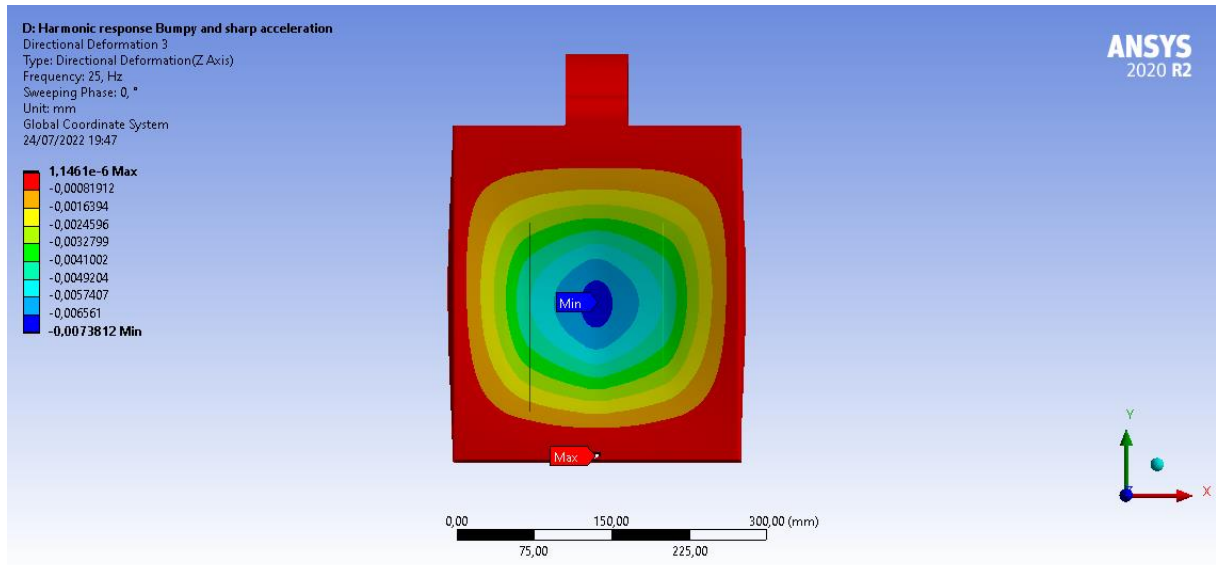
### 4.3.1.2.2 Directional Deformation



(a)



(b)



(c)

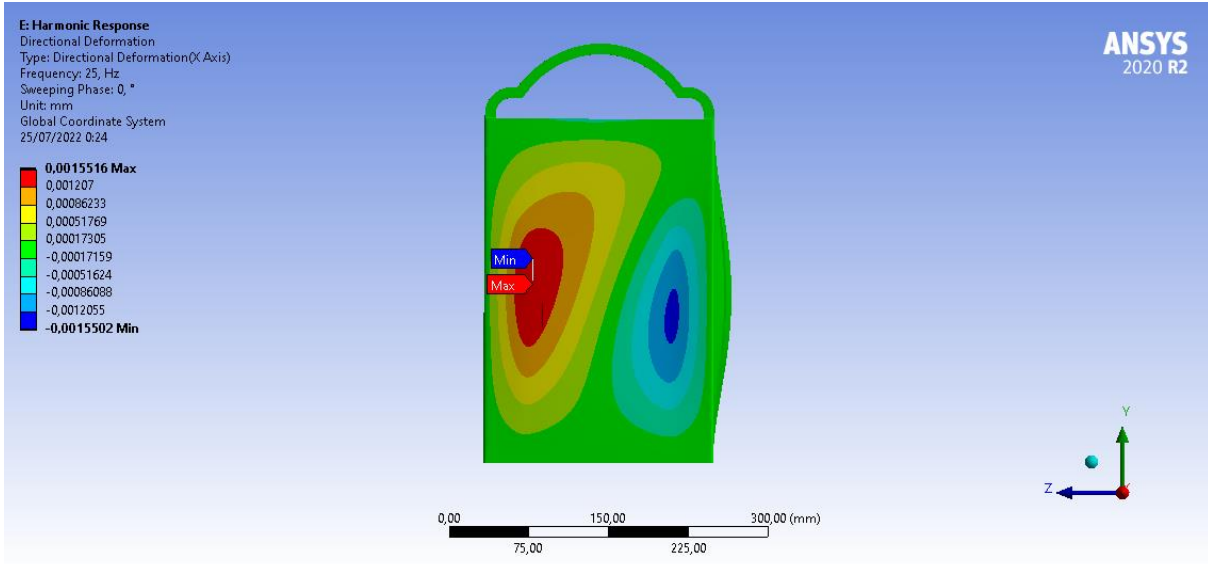
**Gambar 4. 17** *Directional deformation casing battery pack* dengan material *structural steel* pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat pada sumbu (a) x (b) y (c) z.

Pada gambar 4.17 menunjukkan *directional deformation* dengan menggunakan material *structural steel* dari beberapa sumbu. Untuk 4.17(a) merupakan *directional deformation* pada sumbu x dengan deformasi maksimum sebesar 0,0014741 mm. Dapat dilihat deformasi maksimum terdapat pada bagian kiri *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu x, sementara deformasi minimumnya dapat dilihat pada bagian kanan *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu x.

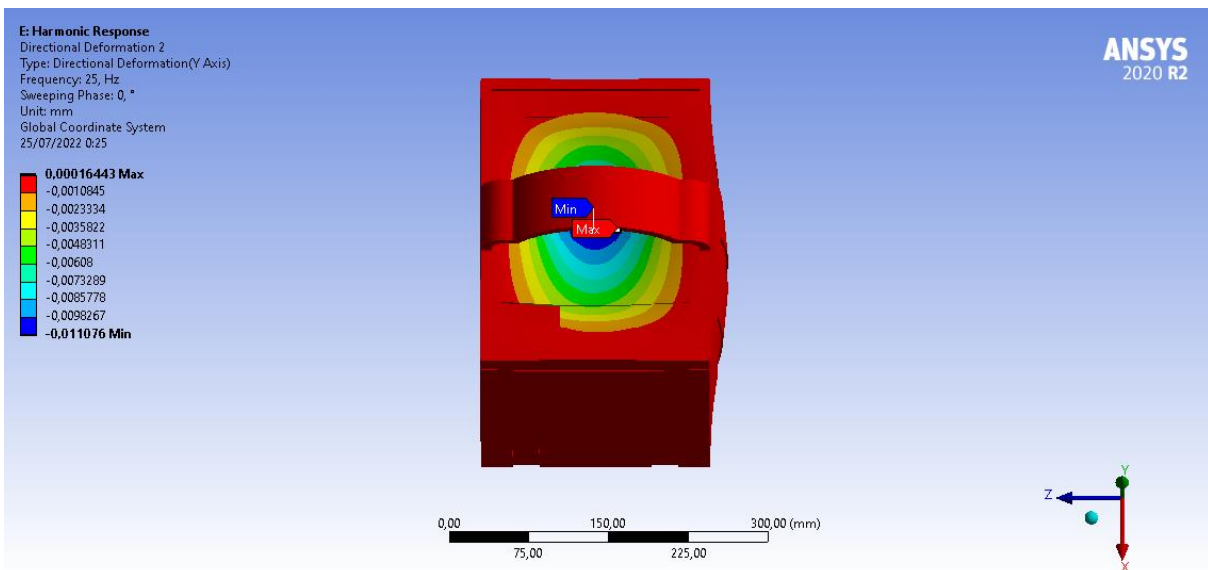
Untuk gambar 4.17(b) merupakan *directional deformation* pada sumbu y dengan deformasi maksimum sebesar 0,00013359 mm. . Dapat dilihat bahwa bagian yang berwarna merah adalah dimana letak deformasi maksimum yang terdapat pada sekeliling bagian atas *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu y. Sementara pada bagian yang berwarna biru adalah deformasi minimumnya. Dapat dilihat deformasi minimum terletak pada bagian tengah *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu y.

Dan untuk gambar 4.17(c) merupakan *directional deformation* pada sumbu z dengan deformasi maksimum sebesar 0,000001461 mm. Pada bagian yang berwarna merah adalah letak deformasi maksimum, dimana deformasi maksimum yang terjadi terdapat pada sekeliling *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu z. Sementara untuk bagian yang berwarna biru adalah letak deformasi minimum dimana deformasi minimum yang terjadi terdapat pada bagian tengah ketika kita menghadap ke sumbu z.

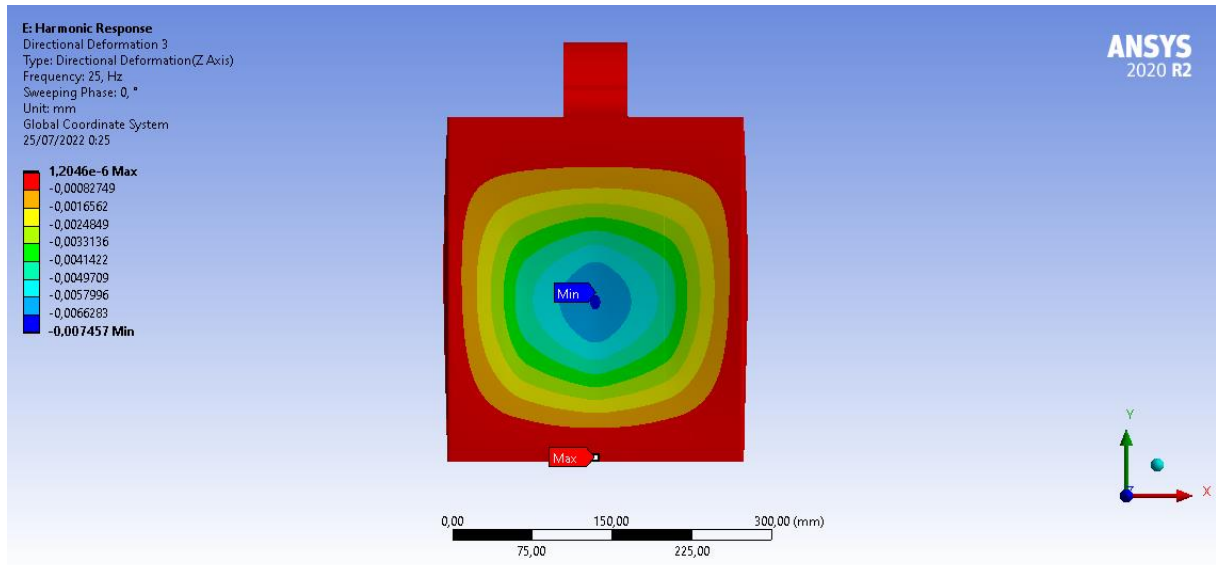




(a)



(b)



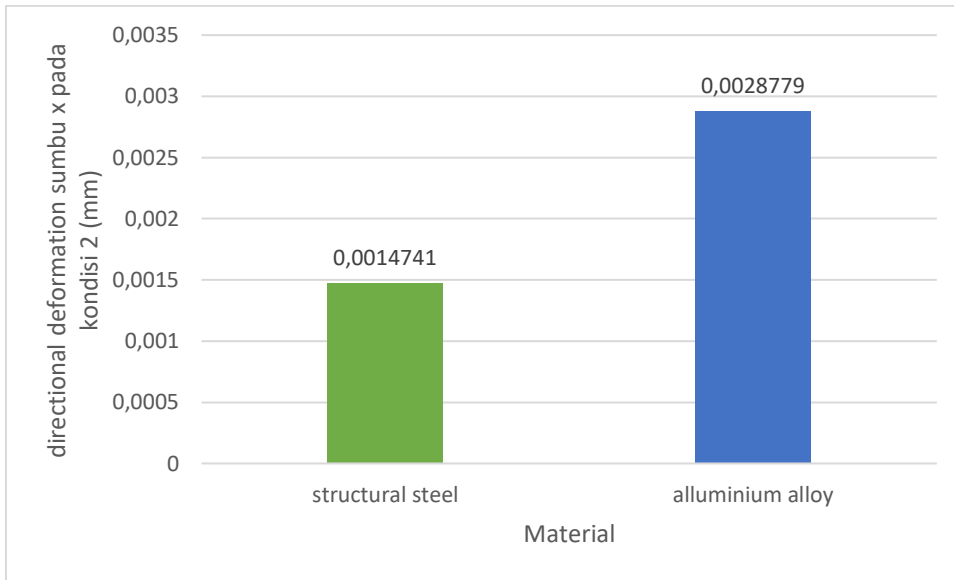
(c)

**Gambar 4. 18** *Directional deformation casing battery pack* dengan material *alluminium alloy* pada kondisi jalan bergelombang dan akselerasi yang dipercepat pada sumbu (a) x (b) y (c) z.

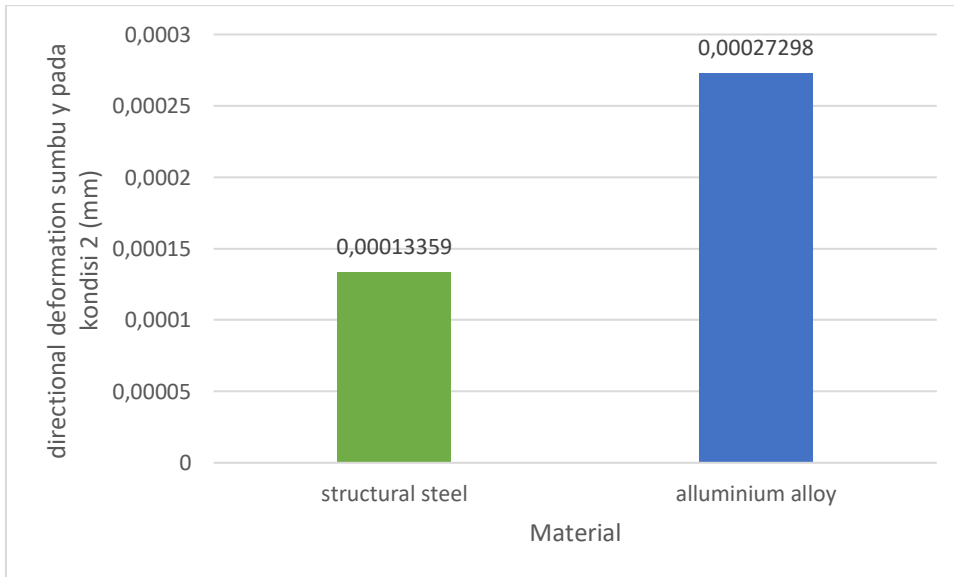
Pada gambar 4.18 menunjukkan *directional deformation* dari beberapa sumbu. Untuk 4.20(a) merupakan *directional deformation* pada sumbu x dengan deformasi maksimum sebesar 0,0028779 mm. Dapat dilihat deformasi maksimum terdapat pada bagian kiri *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu x, sementara deformasi minimumnya dapat dilihat pada bagian kanan *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu x.

Untuk gambar 4.18(b) merupakan *directional deformation* pada sumbu y dengan deformasi maksimum sebesar 0,00027298 mm. . Dapat dilihat bahwa bagian yang berwarna merah adalah dimana letak deformasi maksimum yang terdapat pada sekeliling bagian atas *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu y. Sementara pada bagian yang berwarna biru adalah deformasi minimumnya. Dapat dilihat deformasi minimum terletak pada bagian tengah *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu y.

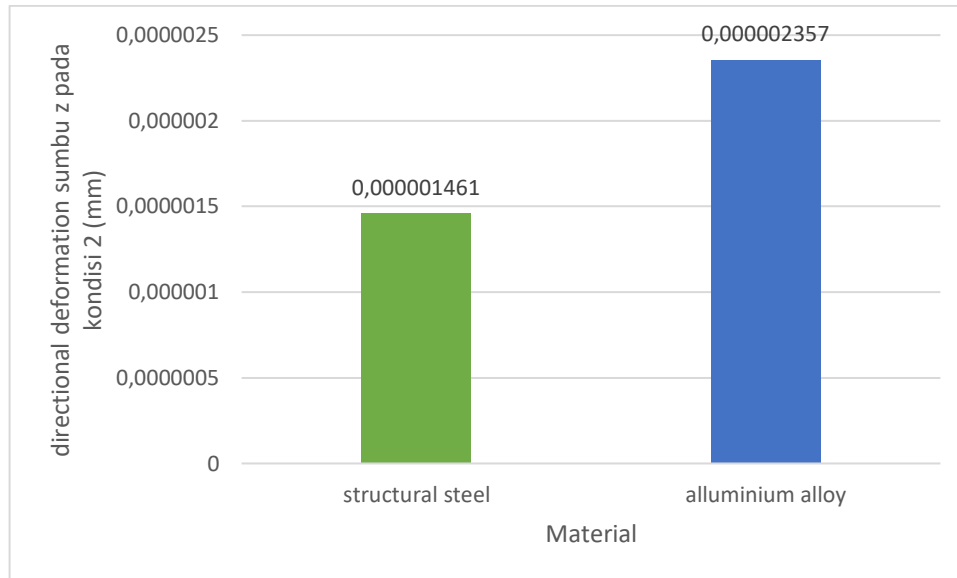
Dan untuk gambar 4.18(c) merupakan *directional deformation* pada sumbu z dengan deformasi maksimum sebesar 0,0000023571 mm. . Pada bagian yang berwarna merah adalah letak deformasi maksimum, dimana deformasi maksimum yang terjadi terdapat pada sekeliling *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu z. Sementara untuk bagian yang berwarna biru adalah letak deformasi minimum dimana deformasi minimum yang terjadi terdapat pada bagian tengah ketika kita menghadap ke sumbu z.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 4. 19** grafik perbandingan *directional deformation* pada sumbu x, y, dan z pada *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* dan *alluminium alloy* pada kondisi 2.

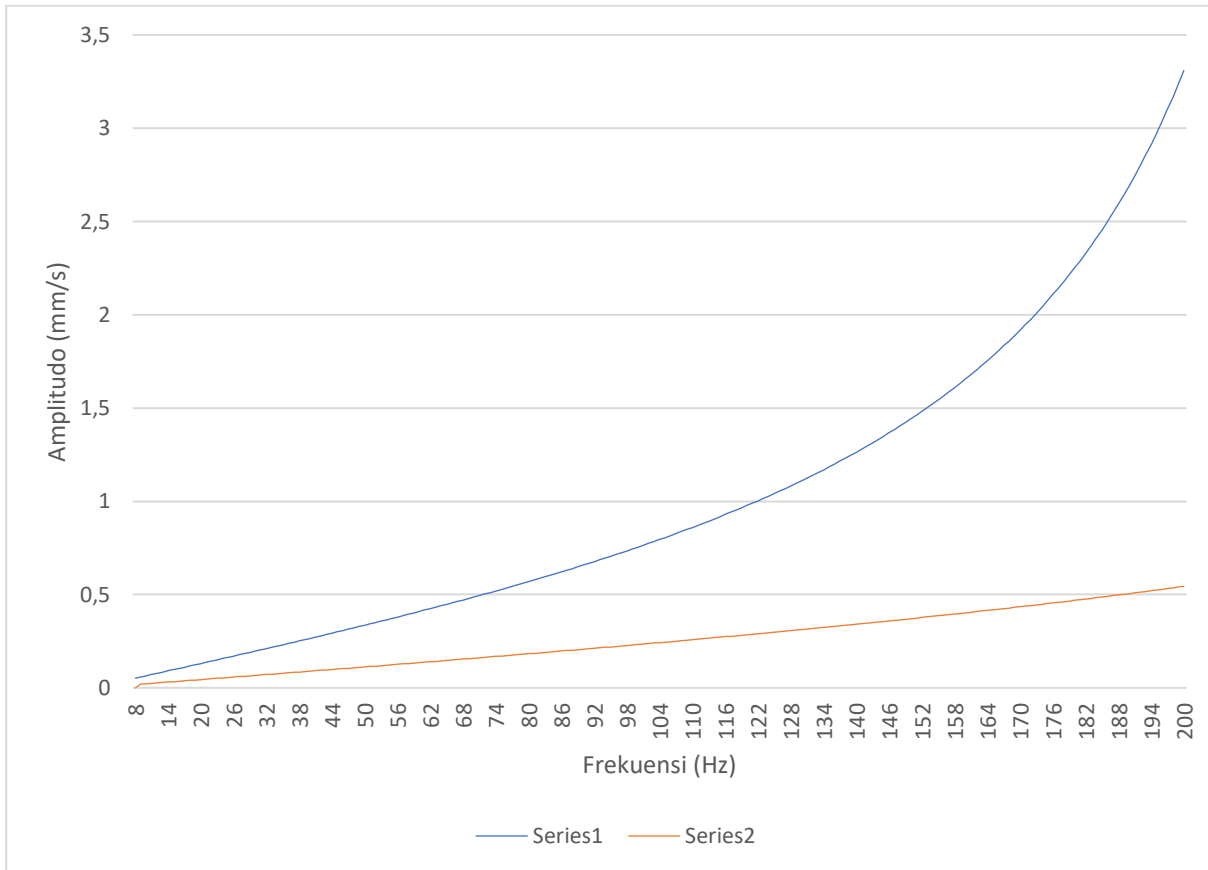
Pada gambar grafik 4.19 terlihat perbandingan *directional deformation* pada sumbu x, y, dan z yang dihasilkan *casing battery pack* dengan menggunakan dua variasi material yaitu *structural steel* dan *alluminium alloy*. Untuk gambar 4.19(a) merupakan *directional deformation* pada sumbu x saat terjadinya kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Dapat dilihat *directional deformation* pada material *structural steel* sebesar 0,0014741 mm dan pada material *alluminium alloy* sebesar 0,0028779 mm.

Untuk gambar 4.19(b) merupakan *directional deformation* pada sumbu y saat terjadinya kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Dapat dilihat *directional deformation* pada material *structural steel* di sumbu y sebesar 0,00013359 mm dan pada material *alluminium alloy* sebesar 0,00027298 mm.

Untuk gambar 4.19(c) merupakan *directional deformation* pada sumbu z saat terjadinya kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Dapat dilihat *directional deformation* pada material *structural steel* di sumbu z sebesar 0,000001461 mm dan pada material *alluminium alloy* sebesar 0,000002357 mm.

Dapat disimpulkan dari ketiga *directional deformation* pada sumbu x, y, dan z saat kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam untuk *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* mempunyai deformasi yang lebih kecil dibandingkan dengan material *alluminium alloy*. Hal ini dikarenakan *yield strength* dari material *alluminium alloy* lebih besar dibandingkan dengan *yield strength* dari material *structural steel*, sehingga material *alluminium alloy* lebih mudah berdeformasi dibandingkan dengan material *structural steel*.

### 4.3.1.2.3 Respon Dinamis



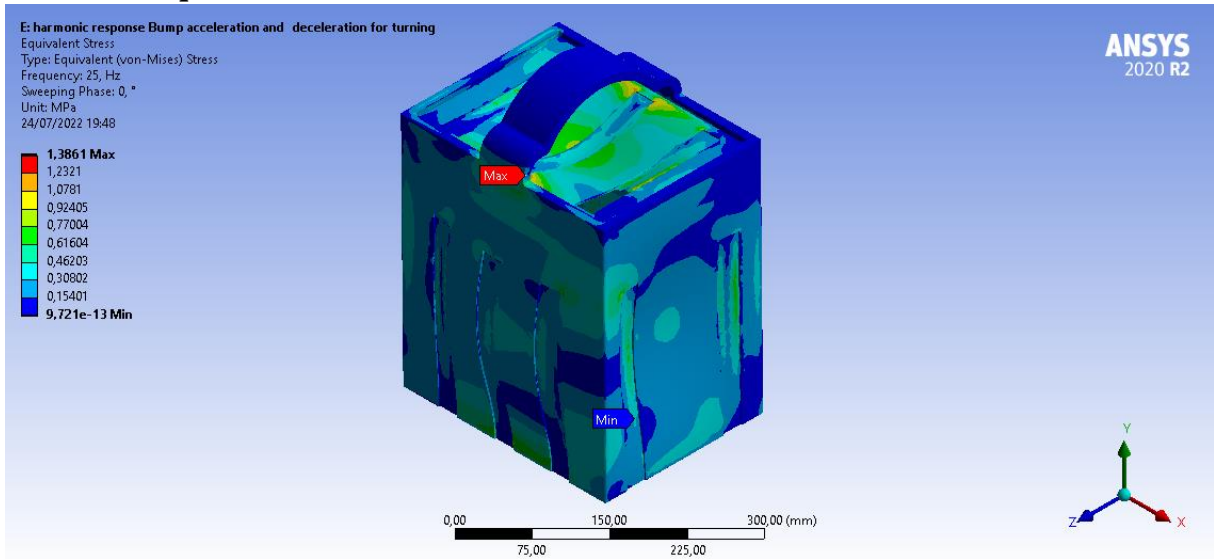
**Gambar 4. 20** Grafik perbandingan material di kondisi 2

Pada gambar grafik 4.20 menunjukkan data perbandingan amplitudo yang dihasilkan dengan frekuensi tertentu pada kondisi 2 yang terjadi pada *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* dan *alluminium alloy*. Dapat dilihat pada gambar 4.20 merupakan grafik perbandingan material tersebut pada kondisi 2. Untuk material *structural steel* amplitudo terendah dihasilkan sebesar 0,051932 mm/s pada frekuensi 8 Hz dan tertinggi sebesar 3,3092 mm/s pada frekuensi 200 Hz. Sedangkan untuk material *alluminium alloy* amplitudo terendah dihasilkan sebesar 0,017723 mm/s pada frekuensi 8 Hz dan tertinggi sebesar 0,54377 mm/s pada frekuensi 200 Hz. . Dapat dilihat disini amplitudo yang dihasilkan oleh *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* lebih besar dibandingkan dengan menggunakan material *alluminium alloy*. Hal ini dikarenakan material *structural steel* mempunyai sifat kekakuan yang lebih besar dibandingkan dengan material *alluminium alloy* sehingga menimbulkan getaran yang lebih besar.

### 4.3.1.3 Kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok

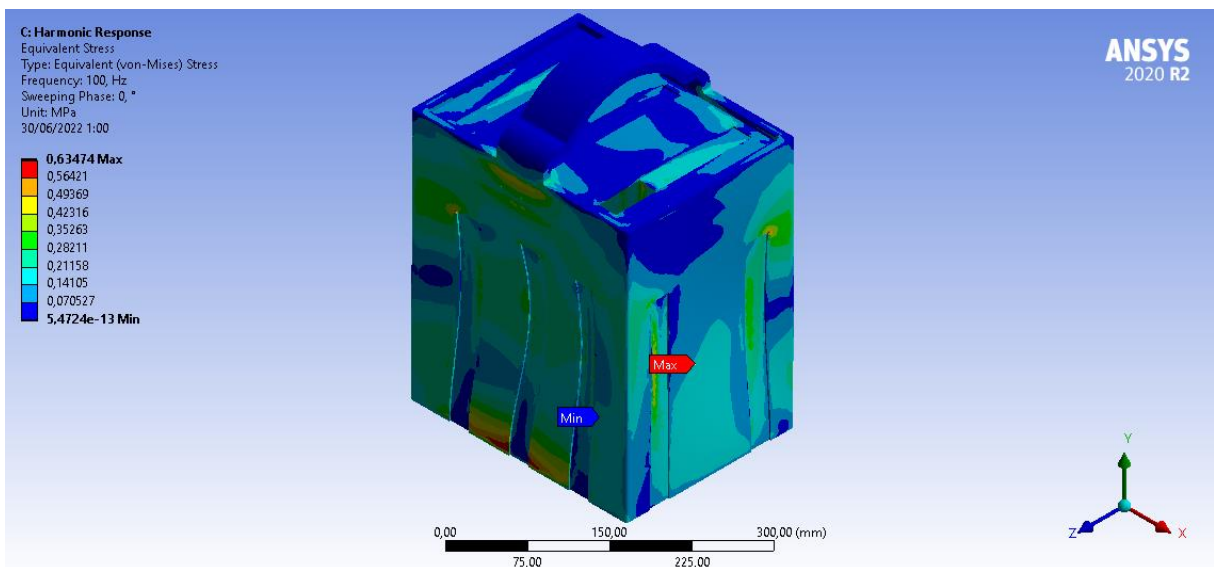
Saat mobil melambat dengan cepat, mobil dipercepat oleh 1 g dalam arah yang berlawanan, Ketika sentripetal percepatan 1 g saat berbelok, percepatan tegak lurus permukaan jalan sebesar 1 g. dan percepatan gravitasi 1 g. Sehingga nanti akan diinput percepatan sebesar 9810 mm/s<sup>2</sup> pada sumbu x, 19620 mm/s<sup>2</sup> pada sumbu y dan -9810 mm/s<sup>2</sup> pada sumbu z. Berikut adalah hasil dari simulasi yang berupa *equivalent stress*, *directional deformation*, dan respon dinamis.

#### 4.3.1.3.1 Equivalent stress



**Gambar 4. 21** *Equivalent stress casing battery pack dengan material structural steel pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok.*

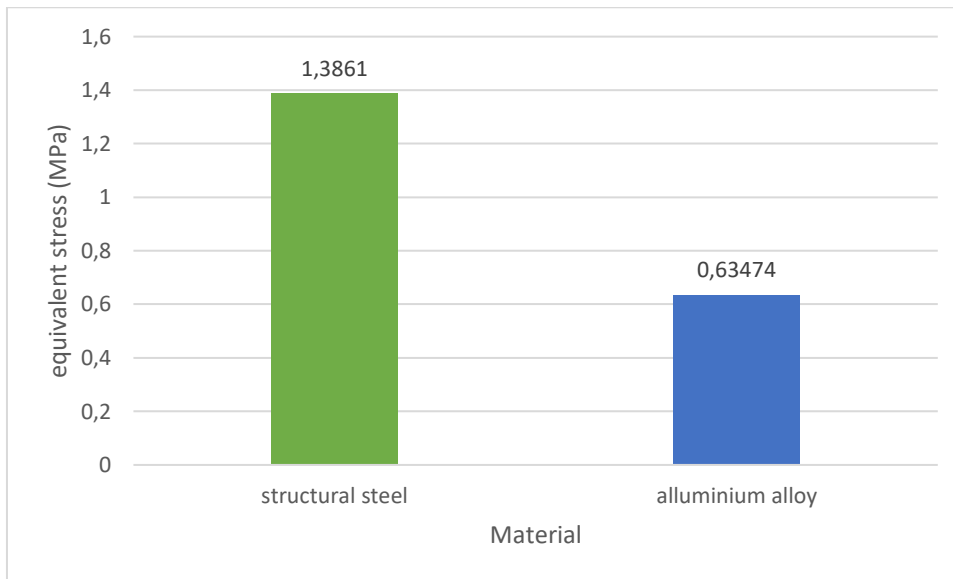
Pada gambar 4.21 merupakan *equivalent stress* pada *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok. Dapat dilihat *stress* maksimum terdapat pada bagian kanan sisi *casing battery pack* atau searah dengan sumbu x. *Stress* maksimum yang terjadi disini sebesar 1,3861 MPa dimana nilai *stress* ini masih jauh dari nilai *yield strength* dari material *structural steel* sebesar 250 MPa.



**Gambar 4. 22** *Equivalent stress casing battery pack dengan material Aluminium Alloy pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok.*

Pada gambar 4.22 merupakan *equivalent stress* pada *casing battery pack* material *aluminium alloy* pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok. Dapat dilihat *stress* maksimum terdapat pada bagian kanan sisi *casing battery pack* atau searah dengan

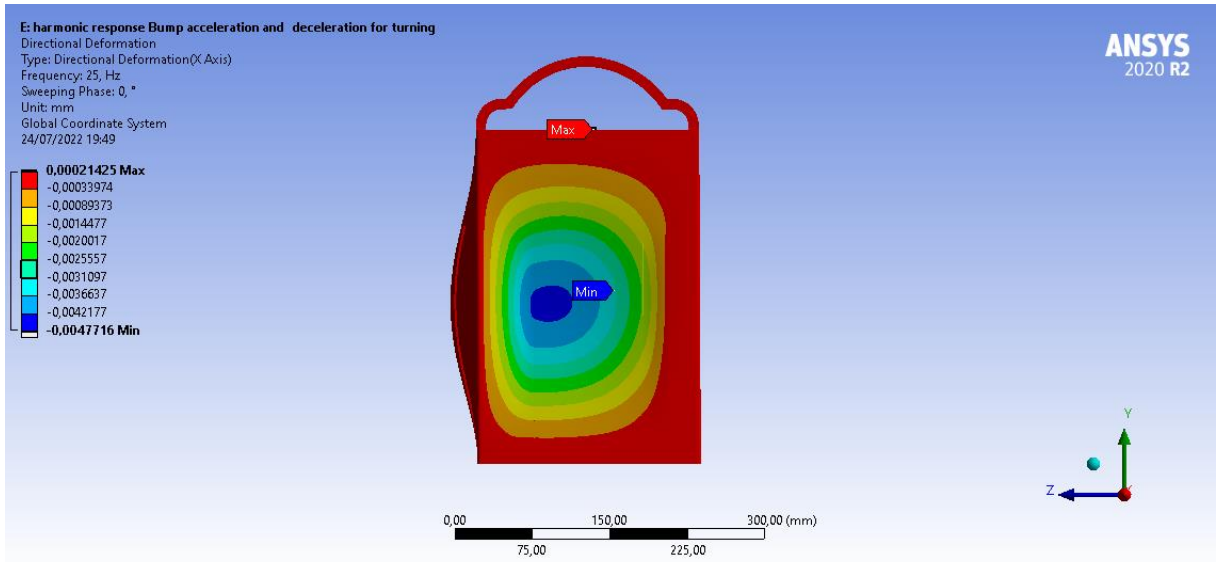
sumbu x. *Stress* maksimum yang terjadi disini sebesar 0,63474 MPa dimana nilai *stress* ini masih jauh dari nilai *yield strength* dari material *structural steel* sebesar 250 MPa. equivalent stress bumpy and sharp deceleration alluminium alloy x axis.



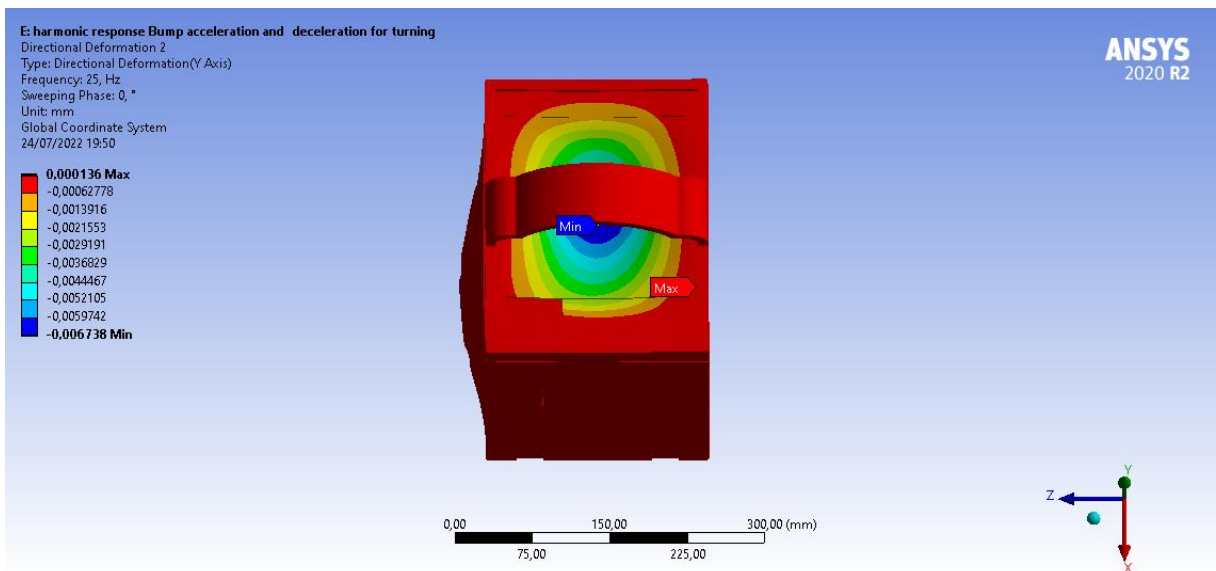
**Gambar 4. 23** Grafik perbandingan *stress casing battery pack* material *structural steel* dan *aluminium alloy* pada sumbu x pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi, dan berbelok.

Pada gambar 4.23 terdapat gambar grafik bar yang menunjukkan perbandingan antara stress maksimum pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi, dan berbelok yang didapat oleh *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* dan material *aluminium alloy*. Untuk stress maksimum yang dihasilkan pada *casing battery pack* dengan material *structural steel* adalah sebesar 1,3841 MPa. Sedangkan stress maksimum yang dihasilkan pada *casing battery pack* dengan menggunakan material *aluminium alloy* adalah sebesar 0,63474 MPa. Stress maksimum dari *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* lebih besar dibandingkan dengan menggunakan material *aluminium alloy*. Hal ini dikarenakan kekakuan yang dimiliki material *structural steel* ini lebih besar dibandingkan dengan material *aluminium alloy*. Sehingga stress yang dihasilkan oleh *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* lebih besar dibandingkan dengan material *aluminium alloy*.

### 4.3.1.3.2 Directional Deformation

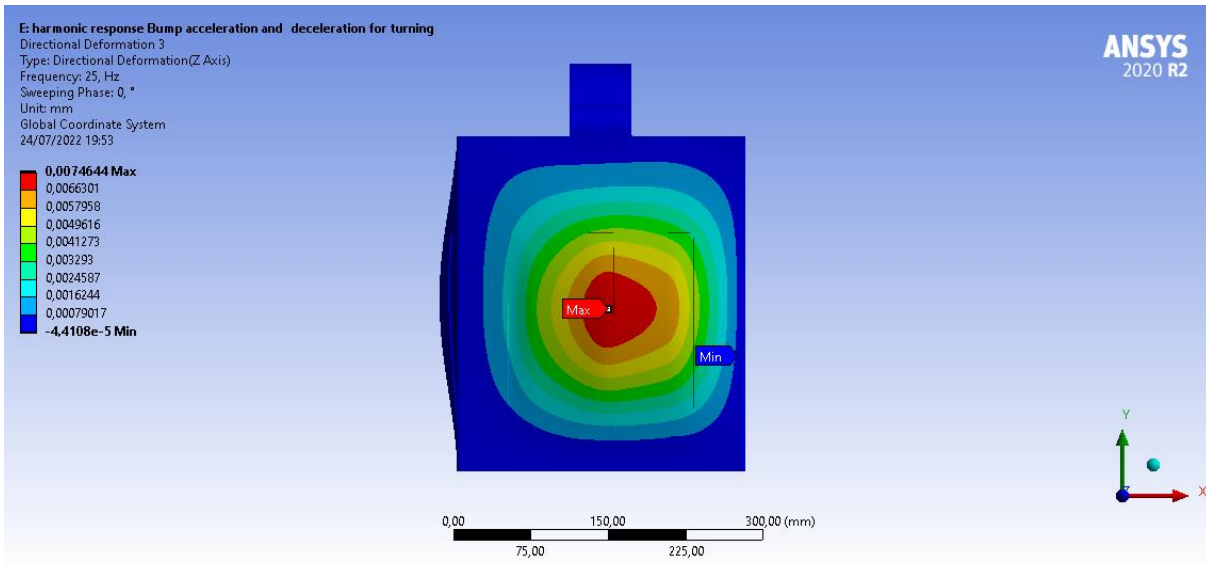


(a)



(b)





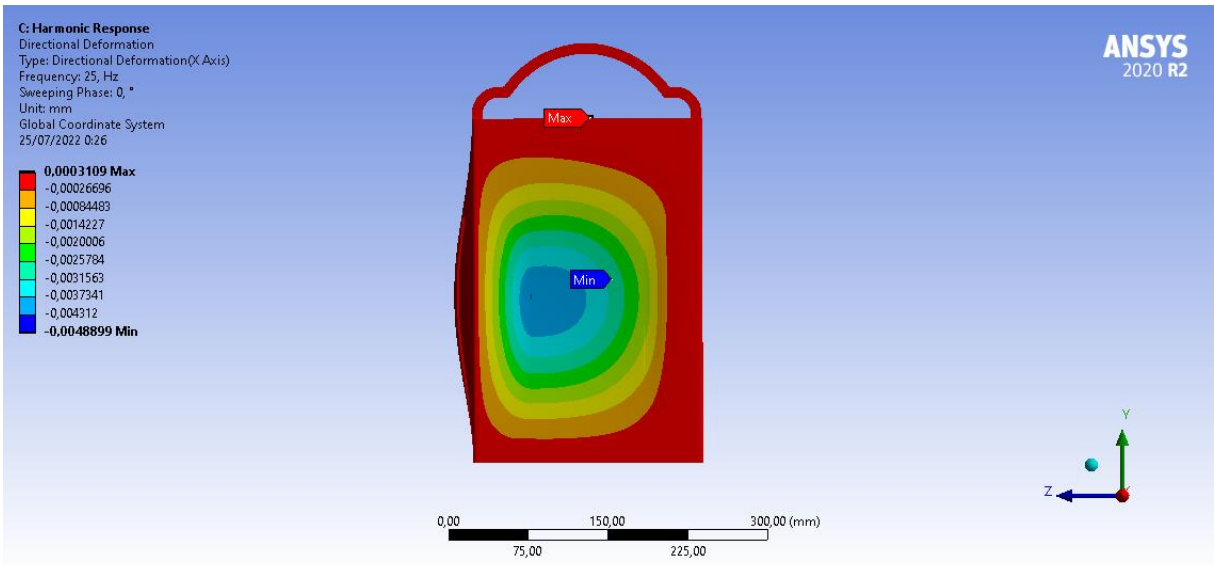
(c)

**Gambar 4. 24** *Directional deformation casing battery pack* dengan material *structural steel* pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok pada sumbu (a) x (b) y (c) z.

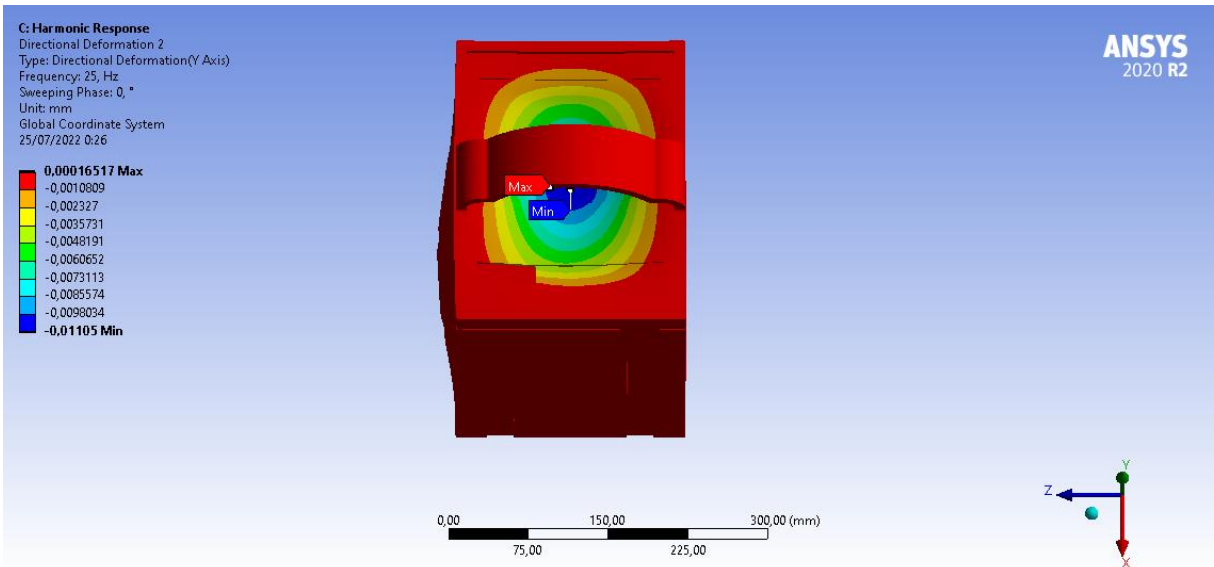
Pada gambar 4.24 menunjukkan *directional deformation* dari beberapa sumbu. Untuk 4.24(a) merupakan *directional deformation* pada sumbu x dengan deformasi maksimum sebesar 0,00021425 mm. Dapat dilihat deformasi maksimum terdapat pada sekeliling *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu x, sementara deformasi minimumnya dapat dilihat pada bagian tengah sedikit ke kiri ketika kita menghadap ke sumbu x.

Untuk gambar 4.24(b) merupakan *directional deformation* pada sumbu y dengan deformasi maksimum sebesar 0,000136 mm. Dapat dilihat bahwa bagian yang berwarna merah adalah dimana letak deformasi maksimum yang terdapat pada bagian tengah pada bagian atas *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu y. Sementara pada bagian yang berwarna biru adalah deformasi minimumnya. Dapat dilihat deformasi minimum terletak pada sekeliling *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu y.

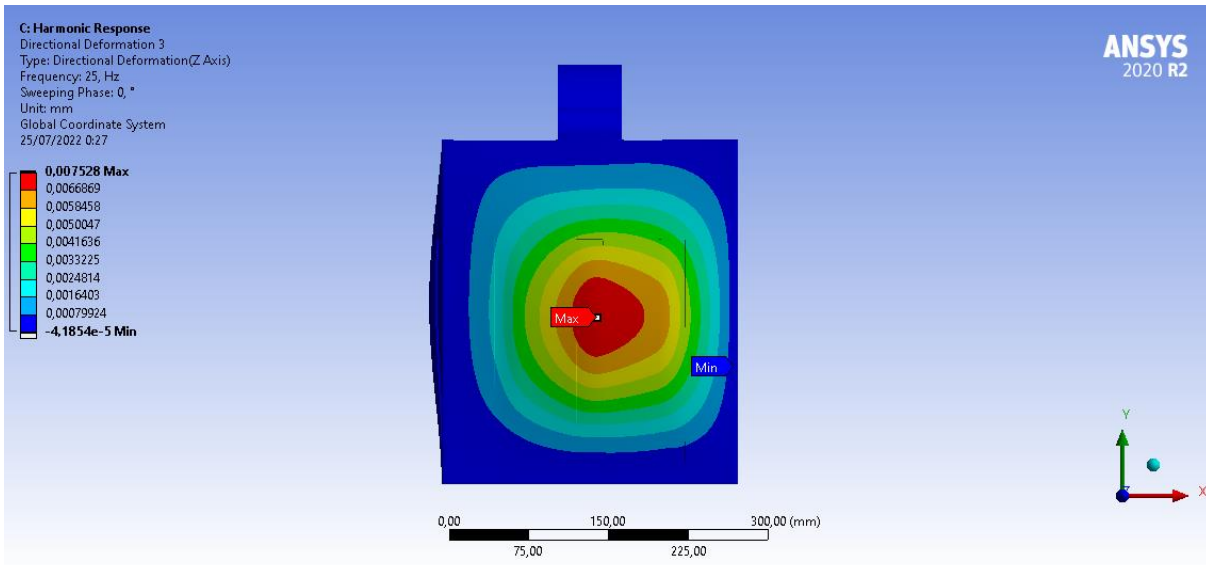
Dan untuk gambar 4.24(c) merupakan *directional deformation* pada sumbu z dengan deformasi maksimum sebesar 0,0074644 mm. Pada bagian yang berwarna merah adalah letak deformasi maksimum, dimana deformasi maksimum yang terjadi terdapat pada bagian tengah *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu z. Sementara untuk bagian yang berwarna biru adalah letak deformasi minimum dimana deformasi minimum yang terjadi terdapat pada sekeliling *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu z.



(a)



(b)



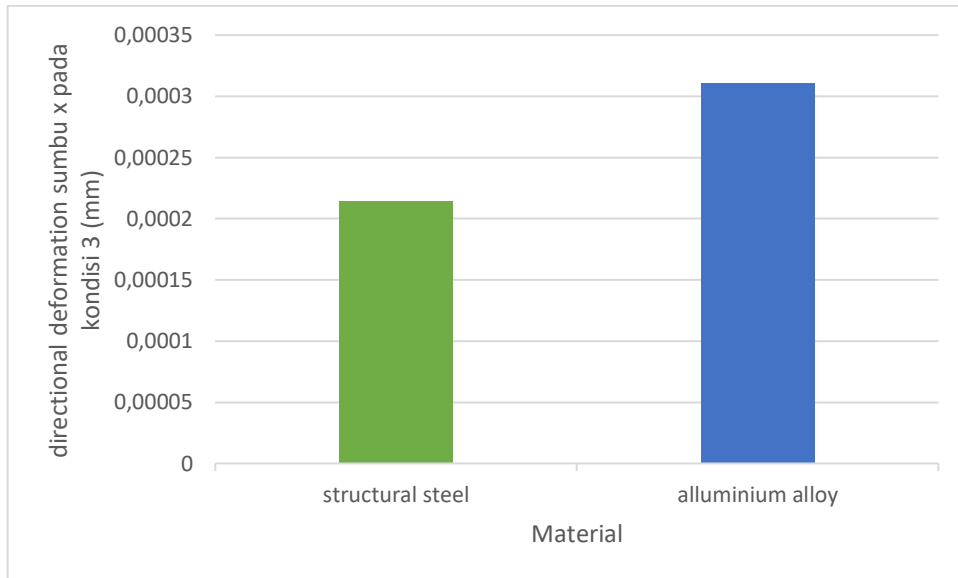
(c)

**Gambar 4. 25** *Directional deformation casing battery pack* dengan material *aluminium alloy* pada kondisi jalan bergelombang, akselerasi, deselerasi dan berbelok pada sumbu (a) x (b) y (c) z.

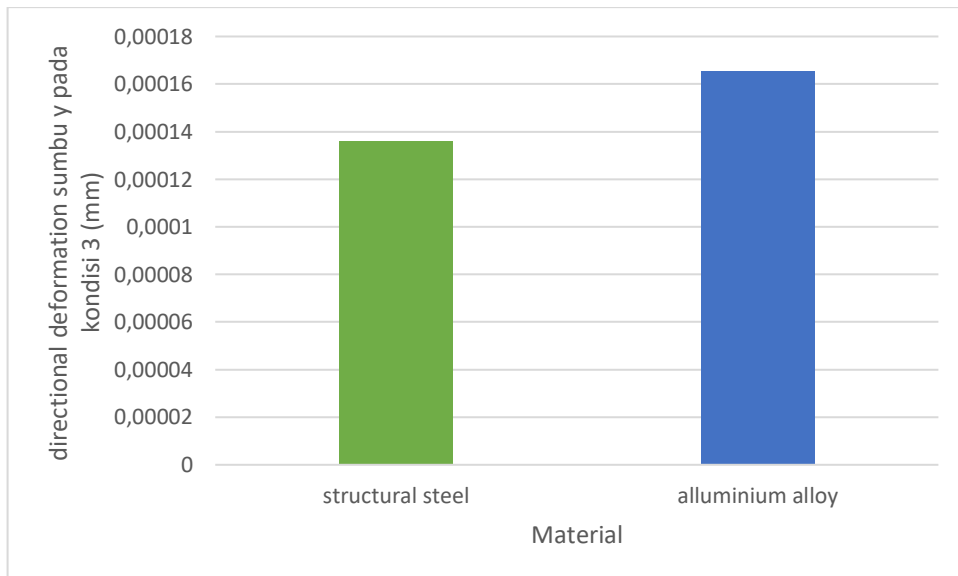
Pada gambar 4.25 menunjukkan *directional deformation* dari beberapa sumbu. Untuk 4.25(a) merupakan *directional deformation* pada sumbu x dengan deformasi maksimum sebesar 0,0003109 mm. Dapat dilihat deformasi maksimum terdapat pada sekeliling *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu x, sementara deformasi minimumnya dapat dilihat pada bagian tengah sedikit ke kiri ketika kita menghadap ke sumbu x.

Untuk gambar 4.25(b) merupakan *directional deformation* pada sumbu y dengan deformasi maksimum sebesar 0,00016517 mm. Dapat dilihat bahwa bagian yang berwarna merah adalah dimana letak deformasi maksimum yang terdapat pada bagian tengah pada bagian atas *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu y. Sementara pada bagian yang berwarna biru adalah deformasi minimumnya. Dapat dilihat deformasi minimum terletak pada sekeliling *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu y.

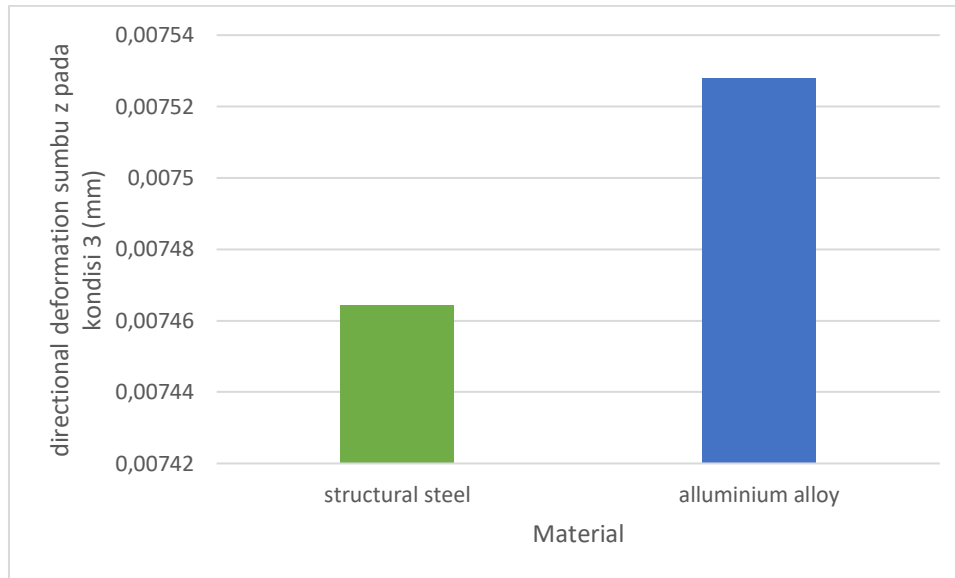
Dan untuk gambar 4.25(c) merupakan *directional deformation* pada sumbu z dengan deformasi maksimum sebesar 0,007528 mm. Pada bagian yang berwarna merah adalah letak deformasi maksimum, dimana deformasi maksimum yang terjadi terdapat pada bagian tengah *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu z. Sementara untuk bagian yang berwarna biru adalah letak deformasi minimum dimana deformasi minimum yang terjadi terdapat pada sekeliling *casing battery pack* ketika kita menghadap ke sumbu z.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 4. 26** grafik perbandingan *directional deformation* pada sumbu x, y, dan z pada casing battery pack dengan menggunakan material *structural steel* dan *aluminium alloy* pada kondisi 3.

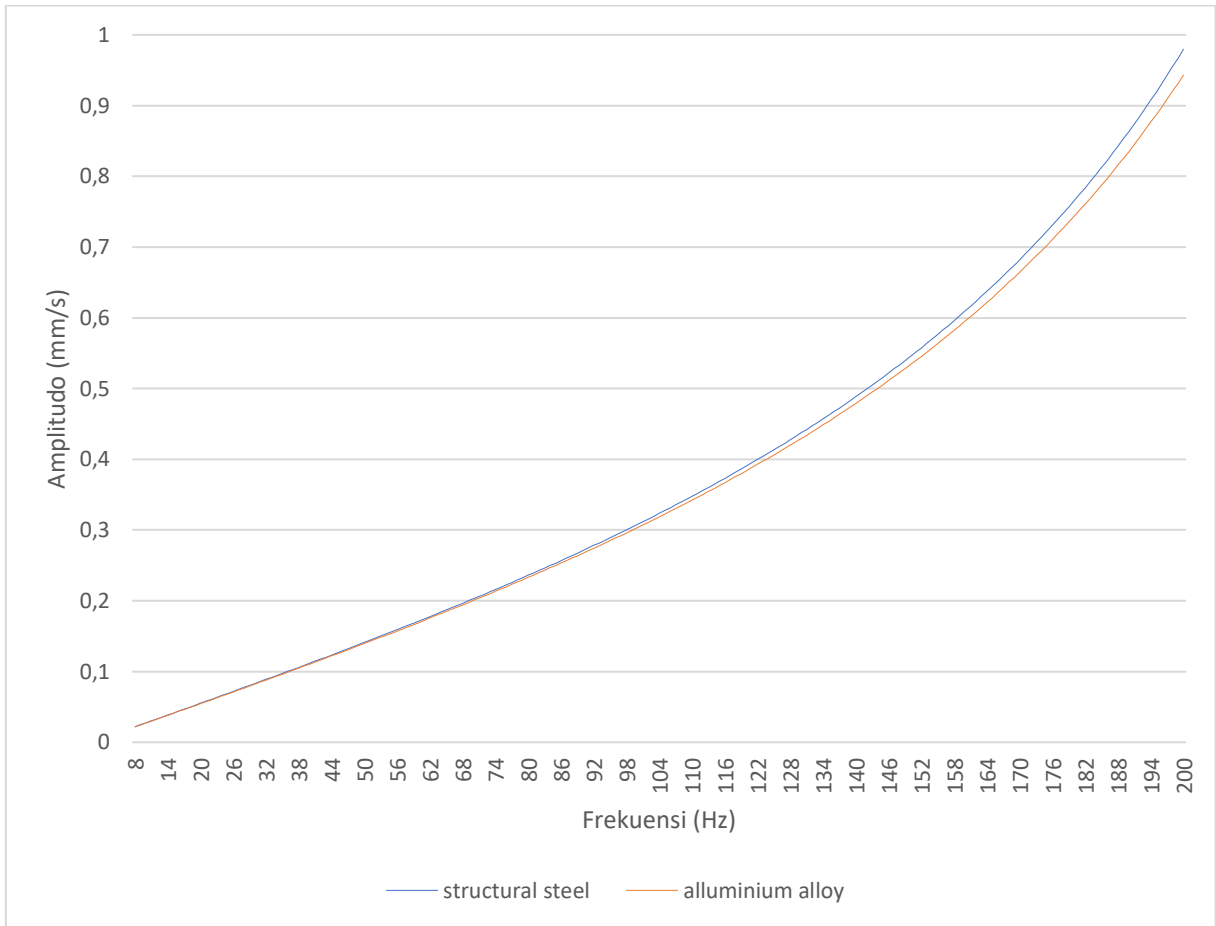
Pada gambar grafik 4.26 terlihat perbandingan *directional deformation* pada sumbu x, y, dan z yang dihasilkan casing battery pack dengan menggunakan dua variasi material yaitu *structural steel* dan *aluminium alloy*. Untuk gambar 4.26(a) merupakan *directional deformation* pada sumbu x saat terjadinya kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Dapat dilihat *directional deformation* pada material *structural steel* sebesar 0,00021425 mm dan pada material *aluminium alloy* sebesar 0,0003109 mm.

Untuk gambar 4.26(b) merupakan *directional deformation* pada sumbu y saat terjadinya kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Dapat dilihat *directional deformation* pada material *structural steel* di sumbu y sebesar 0,000136 mm dan pada material *aluminium alloy* sebesar 0,00016517 mm.

Untuk gambar 4.26(c) merupakan *directional deformation* pada sumbu z saat terjadinya kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam. Dapat dilihat *directional deformation* pada material *structural steel* di sumbu z sebesar 0,0074644 mm dan pada material *aluminium alloy* sebesar 0,007528 mm.

Dapat disimpulkan dari ketiga *directional deformation* pada sumbu x, y, dan z saat kondisi jalan bergelombang dan berbelok tajam untuk casing battery pack dengan menggunakan material *structural steel* mempunyai deformasi yang lebih kecil dibandingkan dengan material *aluminium alloy*. Hal ini dikarenakan *yield strength* dari material *aluminium alloy* lebih besar dibandingkan dengan *yield strength* dari material *structural steel*, sehingga material *aluminium alloy* lebih mudah berdeformasi dibandingkan dengan material *structural steel*.

#### 4.1.3.3 Respon Dinamis



**Gambar 4. 27** Grafik Perbandingan material di kondisi 3

Pada tabel 4.27 menunjukkan data perbandingan amplitudo yang dihasilkan dengan frekuensi tertentu pada kondisi 3 yang terjadi pada *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* dan *aluminium alloy*. Dapat dilihat pada gambar 4.21 merupakan grafik perbandingan material tersebut pada kondisi 3. Untuk material *structural steel* amplitudo terendah dihasilkan sebesar 0,021981 mm/s pada frekuensi 8 Hz dan tertinggi sebesar 0,97982 mm/s pada frekuensi 200 Hz. Sedangkan untuk material *aluminium alloy* amplitudo terendah dihasilkan sebesar 0,021759 mm/s pada frekuensi 8 Hz dan tertinggi sebesar 0,94327mm/s pada frekuensi 200 Hz. Dapat dilihat disini amplitudo yang dihasilkan oleh *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* lebih besar dibandingkan dengan menggunakan material *aluminium alloy*. Hal ini dikarenakan material *structural steel* mempunyai sifat kekakuan yang lebih besar dibandingkan dengan material *aluminium alloy* sehingga menimbulkan getaran yang lebih besar.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan analisa data dan pembahasan dari setiap simulasi penulis dapat menarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada simulasi statis didapatkan hasil :
  - a. Untuk *casing battery pack* dengan menggunakan material *structural steel* memiliki *stress* maksimum sebesar 0,46197 MPa dan deformasi maksimum sebesar 0,000025317 mm.
  - b. Untuk *casing battery pack* dengan menggunakan material *alluminium alloy* memiliki *stress* maksimum sebesar 0,45965 MPa dan deformasi maksimum sebesar 0,000071201 mm.
2. Pada simulasi dinamis didapatkan hasil :
  - a. Pada kondisi 1 material *structural steel* dihasilkan amplitudo getaran sebesar 0,97638 mm/s. *Stress* maksimum yang dihasilkan sebesar 1,3025 MPa dan deformasi direksional yang dihasilkan sebesar 0,00020893 mm pada sumbu x, 0,000085307 mm pada sumbu y dan 0,0015223 mm pada sumbu z. Sedangkan untuk material *alluminium alloy* dihasilkan amplitudo getaran sebesar 0,94012 mm/s. *Stress* maksimum yang dihasilkan sebesar 0,57416 MPa dan deformasi direksional yang dihasilkan sebesar 0,0003057mm pada sumbu x, 0,00013546 mm pada sumbu y dan 0,0015597 mm pada sumbu z.
  - b. Pada kondisi 2 material *structural steel* dihasilkan amplitudo getaran sebesar 3,3092 mm/s. *Stress* maksimum yang dihasilkan sebesar 1,3707 MPa dan deformasi direksional yang dihasilkan sebesar 0,0014741mm pada sumbu x, 0,00013359 mm pada sumbu y dan 0,000001461 mm pada sumbu z. Sedangkan untuk material *alluminium alloy* dihasilkan amplitudo getaran sebesar 0,54377 mm/s. *Stress* maksimum yang dihasilkan sebesar 0,62501 MPa dan deformasi direksional sebesar 0,0028779 mm pada sumbu x, 0,00027298 mm pada sumbu y dan 0,000002357 mm pada sumbu z.
  - c. Pada kondisi 3 material *structural steel* dihasilkan amplitudo getaran sebesar 0,97982 mm/s. *Stress* maksimum yang dihasilkan sebesar 1,3861 MPa dan deformasi direksional yang dihasilkan sebesar 0,00021425mm pada sumbu x, 0,000136mm pada sumbu y, dan 0,0074644 mm pada sumbu z. Sedangkan untuk material *alluminium alloy* dihasilkan amplitudo getaran sebesar 0,94327 mm/s. *Stress* maksimum yang dihasilkan sebesar 0,63474 MPa dan deformasi direksional sebesar 0,0003109 mm pada sumbu x, 0,00016517 mm pada sumbu y dan 0,007528 mm pada sumbu z.
3. Dari hasil yang didapatkan dapat diambil kesimpulan casing battery pack dengan menggunakan material Structural Steel lebih disarankan dibandingkan dengan material Alluminium Alloy dikarenakan stress maksimum yang didapatkan lebih besar dan deformasi yang didapatkan lebih kecil. Sehingga resiko kerusakan yang didapatkan akan lebih kecil.

## 5.2 Saran

Saran yang dapat penulis berikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Menambah variasi modifikasi desain dari *casing battery pack* agar dapat diketahui desain mana yang lebih baik, baik dari kekuatan struktur saat menerima pembebanan statis dan dinamis serta respon dinamis yang dihasilkan.
2. Menambah variasi material agar dapat diketahui material yang cocok untuk *casing battery pack*.



## DAFTAR PUSTAKA

- Fauzan, M. F. (2019). A Review on Recent Progress of Batteries for electric Vehicles. 4441-4461.
- Li, J. C. (2020). Finite Element Analysis of Power Battery Box Chassis of Electric Bus. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Technology and Business University.*
- Rao, S. (2013). *Mechanical Vibration fifth Edition.* Miami: University of Miami.
- Ruang, G. Y. (2021). Simulation and optimization of a new energy vehicle power battery pack structure. *School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University.*
- Wang, J. Z. (2016). Modal Analysis of Battery Box Based on ANSYS. *College of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering and Science.*
- Yang, N. F. (2021). Dynamic and Static analysis of the battery box structure of an electric vehicle. *School of Mechanical Engineering, Tianjing University.*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# LAMPIRAN

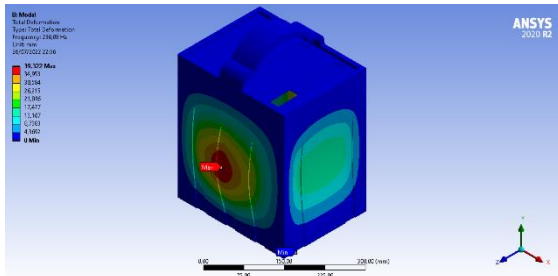
## Standarisasi Pengujian

**Table 9**  
Test conditions for the vibration test at cell (C), module (M), pack (P) and vehicle (V) level.

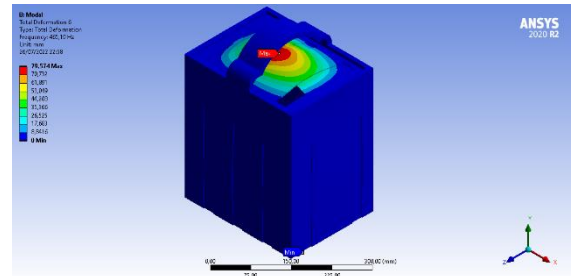
Region of applicability	International				EU and further countries <sup>#</sup>	USA			Korea	India	China
	SAE J2464 [61]	SAE J2929 [66] <sup>†</sup>	ISO 12405-1 (2)(3) [67-69] <sup>†</sup>	IEC 62660-2 (3) [70,71]		UL 2580 [63]	USABC [72]	Freedom CAR [65]			
<b>Level (C, M, P)</b>		C M P	P	C	C M P	C	M <sup>†</sup> P	C M P		M	P
<b>Type of profile</b>	Random	Sine wave	Random	Random	Sine wave logarithmic sweep	Random	Random	<sup>‡</sup> or Sine wave or Random		Sine wave	Linear sweep
<b>Frequency range (Hz)</b>	10-190 <sup>a</sup>	7-200 <sup>d</sup>	5-200 <sup>e</sup>	10-2000 <sup>e</sup>	7-50 <sup>b</sup>	10-2000 <sup>e</sup>	10-190 <sup>a</sup>	10-190 <sup>a</sup>		30-150	10-55
<b>PSD wave random (m s<sup>-2</sup>)<sup>2</sup>/Hz</b>	0.4-11 <sup>a</sup>		0.02-5.8 <sup>e</sup>	0.14-20 <sup>e</sup>		0.14-20 <sup>e</sup>	0.4-11 <sup>a</sup>	0.4-11 <sup>a</sup>			
<b>Loading range sine wave (m s<sup>-2</sup>)</b>		9.81-19.6 (> 12 kg) <sup>d</sup> 9.81-78.5 (< 12 kg) <sup>d</sup>			2-10 <sup>b</sup>			7-49		30	30
<b>Axis</b>	Vertical, longitudinal, lateral	Three mutually perpendicular mounting positions of the cell	Vertical, longitudinal, transversal		Vertical		Vertical, longitudinal, lateral			Vertical axis and horizontal	Vertical
<b>SOC (% rated capacity)</b>	95-100% max. normal vehicle operation		50	80 (HEV) 100 (BEV)	> 50% normal operating range	80 (HEV) 100 (BEV)	100 & 20 (Z-sine, random) 60 (X & Y-sine, random)	100 & 20 (Z-sine, random) 60 (X & Y-sine, random)		100	
<b>Vehicle level (V)</b>	SOC at normal vehicle operation										

# Analisa Modal

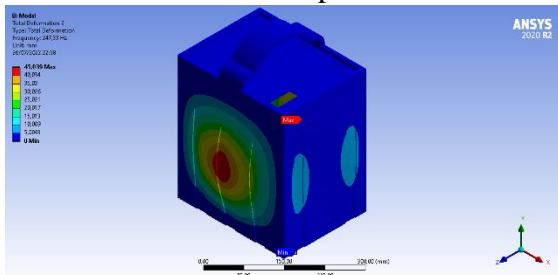
## Mode Shape Casing Battery Pack Menggunakan Material Structural Steel



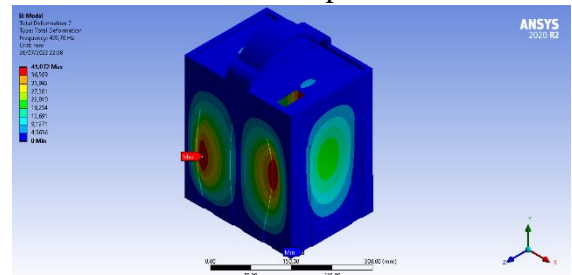
mode shape 1



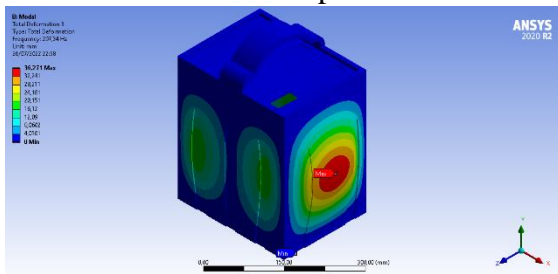
mode shape 6



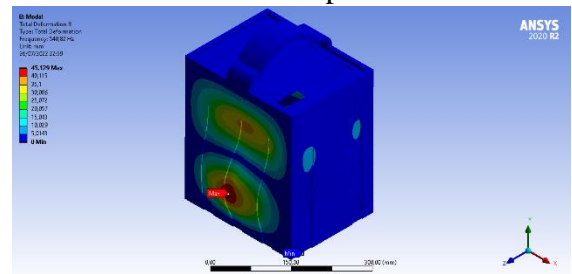
mode shape 2



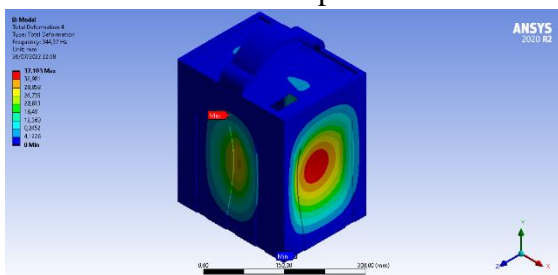
mode shape 7



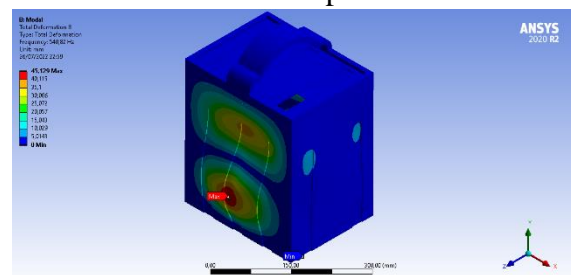
mode shape 3



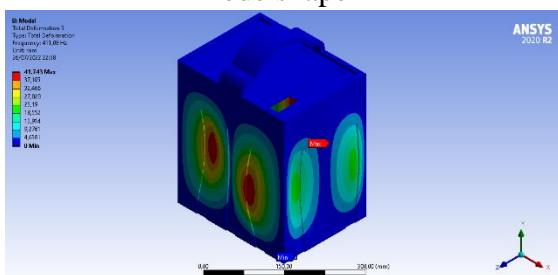
mode shape 8



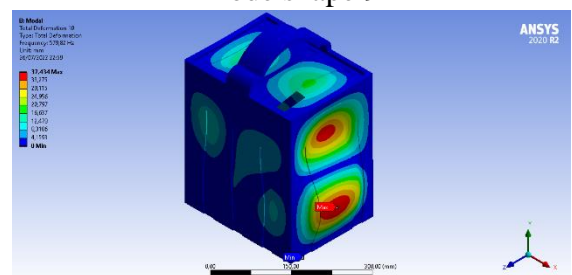
mode shape 4



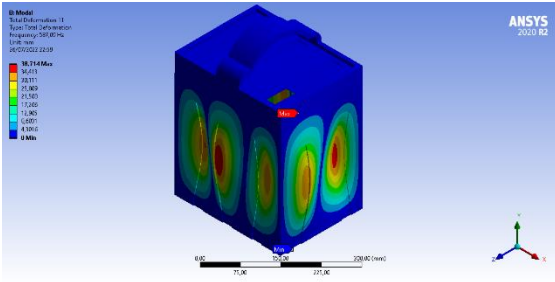
mode shape 9



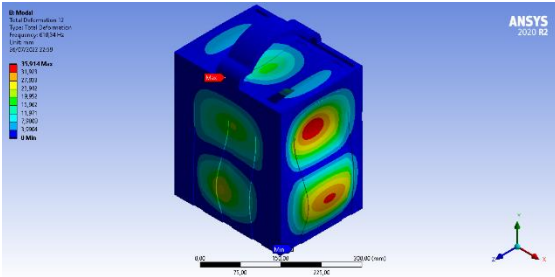
mode shape 5



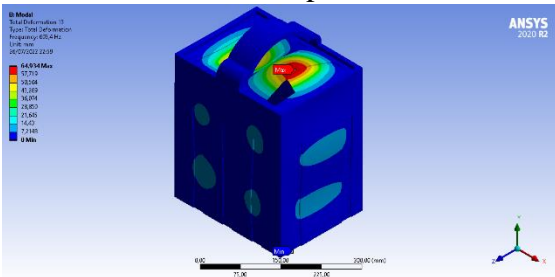
mode shape 10



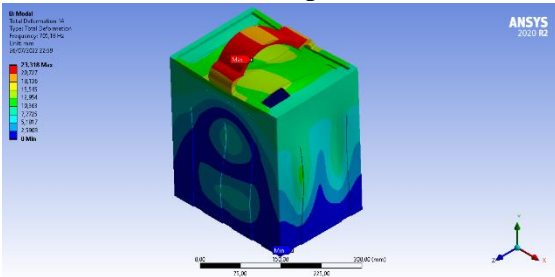
mode shape 11



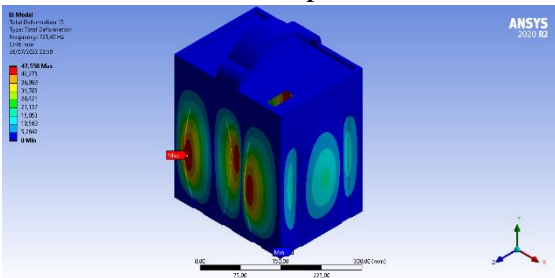
mode shape 12



mode shape 13

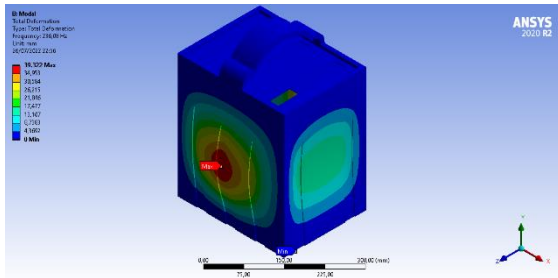


mode shape 14

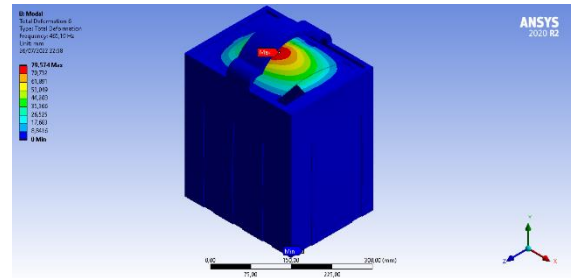


mode shape 15

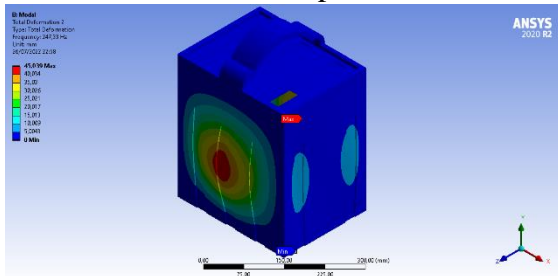
# Mode Shape Casing Battery Pack Menggunakan Material Aluminium Alloy



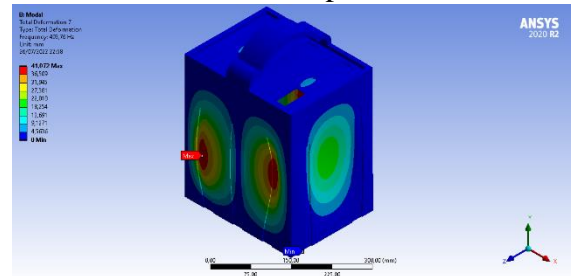
mode shape 1



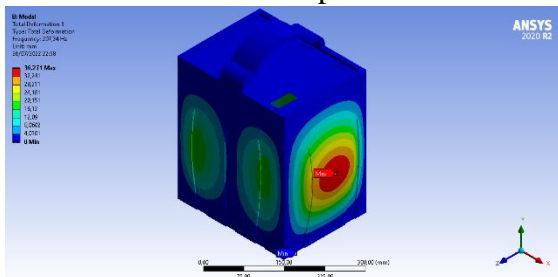
mode shape 6



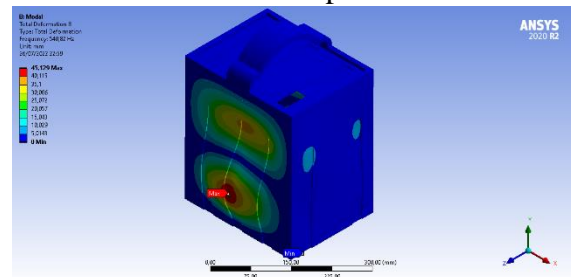
mode shape 2



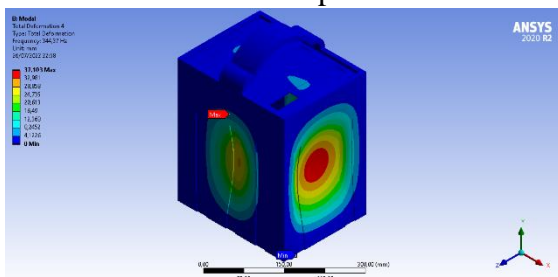
mode shape 7



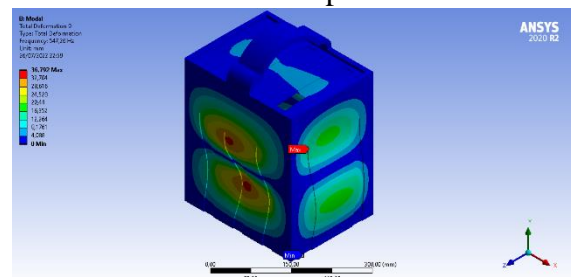
mode shape 3



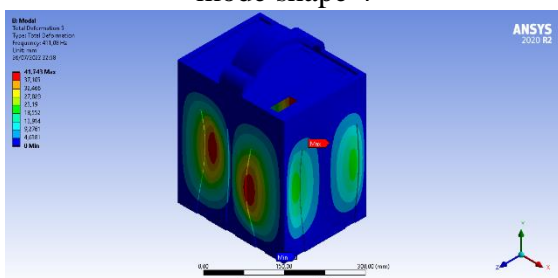
mode shape 8



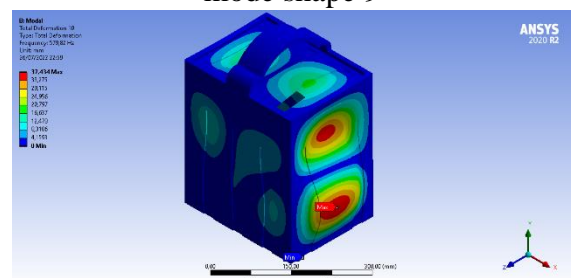
mode shape 4



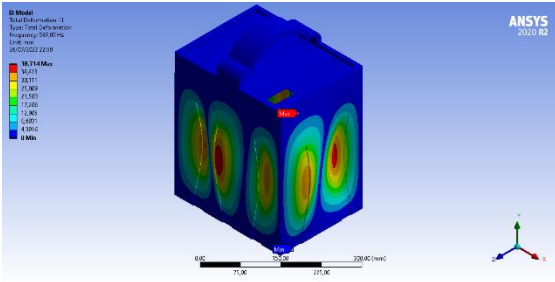
mode shape 9



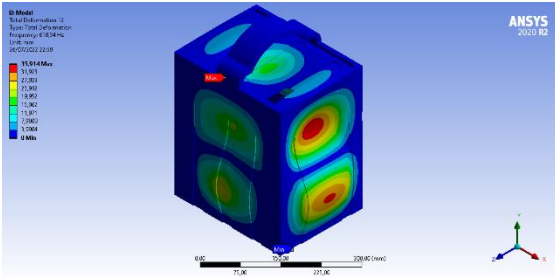
mode shape 5



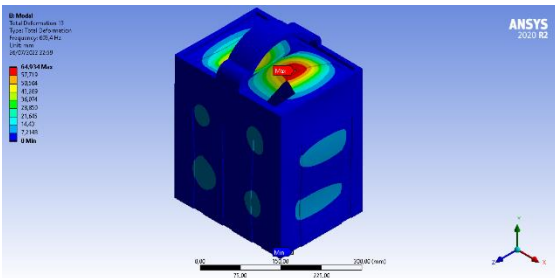
mode shape 10



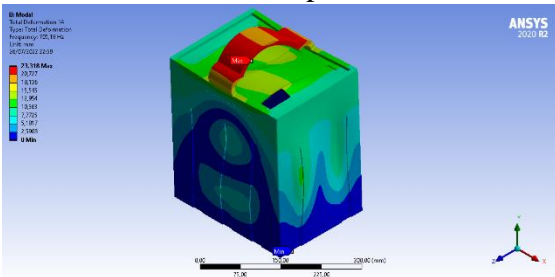
mode shape 11



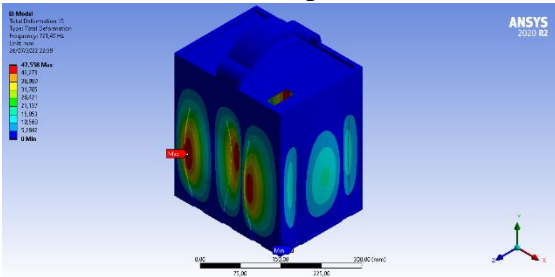
mode shape 12



mode shape 13



mode shape 14



mode shape 15





## Analisa Harmonic Response

### Respon dinamis kondisi 1

Frekuensi (Hz)	amplitudo structural steel (mm/s)	amplitudo alluminium alloy (mm/s)
8	0,022000	0,021683
9	0,024755	0,024398
10	0,027511	0,027114
11	0,030269	0,029832
12	0,033029	0,032552
13	0,035791	0,035274
14	0,038555	0,037998
15	0,041322	0,040724
16	0,044091	0,043453
17	0,046864	0,046185
18	0,049639	0,048919
19	0,052418	0,051657
20	0,055200	0,054398
21	0,057985	0,057142
22	0,060775	0,059890
23	0,063568	0,062642
24	0,066366	0,065398
25	0,069168	0,068158
26	0,071974	0,070922
27	0,074785	0,073691
28	0,077601	0,076464
29	0,080422	0,079243
30	0,083249	0,082026
31	0,086081	0,084814
32	0,088918	0,087608
33	0,091762	0,090408
34	0,094611	0,093214
35	0,097467	0,096025
36	0,100330	0,098843
37	0,103200	0,101670
38	0,106070	0,104500
39	0,108960	0,107330
40	0,111850	0,110180
41	0,114750	0,113030
42	0,117650	0,115890
43	0,120570	0,118760
44	0,123490	0,121630
45	0,126420	0,124510
46	0,129360	0,127400
47	0,132300	0,130300
48	0,135260	0,133210

49	0,138230	0,136120
50	0,141200	0,139050
51	0,144190	0,141980
52	0,147180	0,144930
53	0,150190	0,147880
54	0,153200	0,150850
55	0,156230	0,153820
56	0,159260	0,156800
57	0,162310	0,159800
58	0,165370	0,162800
59	0,168440	0,165820
60	0,171530	0,168850
61	0,174620	0,171890
62	0,177730	0,174940
63	0,180850	0,178000
64	0,183980	0,181080
65	0,187130	0,184170
66	0,190290	0,187270
67	0,193470	0,190380
68	0,196650	0,193510
69	0,199860	0,196650
70	0,203070	0,199810
71	0,206300	0,202980
72	0,209550	0,206160
73	0,212810	0,209360
74	0,216090	0,212580
75	0,219390	0,215810
76	0,222700	0,219050
77	0,226030	0,222310
78	0,229370	0,225590
79	0,232730	0,228880
80	0,236110	0,232190
81	0,239510	0,235520
82	0,242930	0,238860
83	0,246370	0,242230
84	0,249820	0,245610
85	0,253290	0,249010
86	0,256790	0,252430
87	0,260300	0,255860
88	0,263840	0,259320
89	0,267390	0,262800
90	0,270970	0,266290
91	0,274570	0,269810
92	0,278190	0,273350
93	0,281830	0,276910
94	0,285500	0,280490

95	0,289190	0,284100
96	0,292910	0,287720
97	0,296640	0,291370
98	0,300410	0,295050
99	0,304200	0,298750
100	0,308010	0,302470
101	0,311850	0,306210
102	0,315720	0,309980
103	0,319610	0,313780
104	0,323530	0,317600
105	0,327480	0,321450
106	0,331460	0,325330
107	0,335470	0,329230
108	0,339510	0,333170
109	0,343580	0,337130
110	0,347670	0,341120
111	0,351800	0,345140
112	0,355970	0,349190
113	0,360160	0,353270
114	0,364390	0,357380
115	0,368650	0,361520
116	0,372950	0,365700
117	0,377280	0,369910
118	0,381640	0,374150
119	0,386050	0,378430
120	0,390490	0,382740
121	0,394970	0,387080
122	0,399480	0,391470
123	0,404040	0,395890
124	0,408640	0,400350
125	0,413270	0,404840
126	0,417950	0,409380
127	0,422670	0,413950
128	0,427440	0,418570
129	0,432250	0,423220
130	0,437100	0,427920
131	0,442000	0,432660
132	0,446940	0,437450
133	0,451940	0,442280
134	0,456980	0,447150
135	0,462070	0,452070
136	0,467210	0,457040
137	0,472400	0,462060
138	0,477650	0,467120
139	0,482950	0,472240
140	0,488300	0,477410

141	0,493710	0,482620
142	0,499180	0,487900
143	0,504700	0,493220
144	0,510290	0,498600
145	0,515930	0,504040
146	0,521640	0,509530
147	0,527410	0,515090
148	0,533240	0,520700
149	0,539140	0,526370
150	0,545100	0,532110
151	0,551140	0,537910
152	0,557240	0,543770
153	0,563420	0,549700
154	0,569670	0,555700
155	0,575990	0,561770
156	0,582400	0,567910
157	0,588870	0,574120
158	0,595430	0,580400
159	0,602070	0,586760
160	0,608800	0,593190
161	0,615600	0,599710
162	0,622500	0,606300
163	0,629490	0,612980
164	0,636560	0,619740
165	0,643730	0,626590
166	0,651000	0,633520
167	0,658360	0,640550
168	0,665830	0,647660
169	0,673390	0,654870
170	0,681060	0,662180
171	0,688840	0,669580
172	0,696730	0,677080
173	0,704730	0,684690
174	0,712850	0,692410
175	0,721090	0,700230
176	0,729440	0,708160
177	0,737930	0,716200
178	0,746540	0,724360
179	0,755280	0,732640
180	0,764150	0,741040
181	0,773170	0,749570
182	0,782320	0,758220
183	0,791620	0,767010
184	0,801070	0,775930
185	0,810680	0,784980
186	0,820440	0,794180

187	0,830360	0,803530
188	0,840450	0,813020
189	0,850710	0,822670
190	0,861150	0,832470
191	0,871760	0,842430
192	0,882570	0,852560
193	0,893560	0,862860
194	0,904750	0,873330
195	0,916150	0,883990
196	0,927750	0,894830
197	0,939570	0,905850
198	0,951610	0,917070
199	0,963870	0,928500
200	0,976380	0,940120

### Respon Dinamis Kondisi 2

Frekuensi (Hz)	amplitudo structural steel (mm/s)	amplitudo alluminium alloy (mm/s)
8	0,051932	0,017723
9	0,058437	0,01994
10	0,064947	0,022157
11	0,071462	0,024375
12	0,077983	0,026594
13	0,084511	0,028813
14	0,091045	0,031034
15	0,097587	0,033255
16	0,10414	0,035477
17	0,1107	0,0377
18	0,11726	0,039924
19	0,12384	0,042149
20	0,13043	0,044375
21	0,13703	0,046603
22	0,14364	0,048832
23	0,15026	0,051062
24	0,1569	0,053294
25	0,16354	0,055527
26	0,17021	0,057762
27	0,17688	0,059998
28	0,18357	0,062236
29	0,19028	0,064476
30	0,197	0,066717
31	0,20374	0,068961
32	0,2105	0,071206
33	0,21727	0,073453
34	0,22407	0,075703

35	0,23088	0,077954
36	0,23771	0,080208
37	0,24457	0,082464
38	0,25144	0,084722
39	0,25834	0,086983
40	0,26525	0,089246
41	0,2722	0,091511
42	0,27916	0,093779
43	0,28615	0,09605
44	0,29317	0,098324
45	0,30021	0,1006
46	0,30728	0,10288
47	0,31437	0,10516
48	0,3215	0,10745
49	0,32865	0,10973
50	0,33583	0,11203
51	0,34305	0,11432
52	0,35029	0,11662
53	0,35757	0,11892
54	0,36487	0,12122
55	0,37222	0,12353
56	0,37959	0,12584
57	0,38701	0,12816
58	0,39446	0,13048
59	0,40194	0,1328
60	0,40947	0,13512
61	0,41703	0,13745
62	0,42463	0,13979
63	0,43227	0,14213
64	0,43996	0,14447
65	0,44769	0,14681
66	0,45546	0,14917
67	0,46327	0,15152
68	0,47113	0,15388
69	0,47904	0,15624
70	0,487	0,15861
71	0,495	0,16098
72	0,50306	0,16336
73	0,51116	0,16574
74	0,51932	0,16813
75	0,52753	0,17052
76	0,53579	0,17292
77	0,54412	0,17532
78	0,55249	0,17773
79	0,56093	0,18014
80	0,56943	0,18256

81	0,57798	0,18499
82	0,5866	0,18742
83	0,59528	0,18985
84	0,60403	0,19229
85	0,61285	0,19474
86	0,62173	0,19719
87	0,63068	0,19965
88	0,6397	0,20211
89	0,6488	0,20458
90	0,65796	0,20706
91	0,66721	0,20954
92	0,67653	0,21203
93	0,68593	0,21452
94	0,69542	0,21703
95	0,70498	0,21953
96	0,71463	0,22205
97	0,72437	0,22457
98	0,73419	0,2271
99	0,74411	0,22964
100	0,75412	0,23218
101	0,76422	0,23473
102	0,77442	0,23729
103	0,78472	0,23985
104	0,79512	0,24242
105	0,80562	0,245
106	0,81623	0,24759
107	0,82695	0,25019
108	0,83778	0,25279
109	0,84872	0,2554
110	0,85978	0,25802
111	0,87096	0,26065
112	0,88226	0,26328
113	0,89369	0,26593
114	0,90524	0,26858
115	0,91693	0,27124
116	0,92875	0,27391
117	0,9407	0,27659
118	0,9528	0,27928
119	0,96504	0,28198
120	0,97743	0,28468
121	0,98997	0,2874
122	1,0027	0,29012
123	1,0155	0,29286
124	1,0285	0,2956
125	1,0417	0,29835
126	1,0551	0,30112

127	1,0686	0,30389
128	1,0823	0,30667
129	1,0962	0,30947
130	1,1103	0,31227
131	1,1246	0,31509
132	1,1391	0,31791
133	1,1538	0,32075
134	1,1687	0,32359
135	1,1838	0,32645
136	1,1992	0,32932
137	1,2148	0,3322
138	1,2306	0,33509
139	1,2466	0,338
140	1,263	0,34091
141	1,2795	0,34384
142	1,2964	0,34678
143	1,3135	0,34973
144	1,3308	0,35269
145	1,3485	0,35567
146	1,3665	0,35866
147	1,3848	0,36166
148	1,4034	0,36467
149	1,4223	0,3677
150	1,4415	0,37074
151	1,4611	0,37379
152	1,4811	0,37686
153	1,5014	0,37994
154	1,5222	0,38303
155	1,5433	0,38614
156	1,5648	0,38926
157	1,5867	0,3924
158	1,6091	0,39555
159	1,6319	0,39872
160	1,6552	0,4019
161	1,679	0,4051
162	1,7032	0,40831
163	1,728	0,41153
164	1,7533	0,41478
165	1,7792	0,41803
166	1,8057	0,42131
167	1,8327	0,4246
168	1,8604	0,42791
169	1,8887	0,43123
170	1,9177	0,43457
171	1,9474	0,43793
172	1,9778	0,4413



173	2,0089	0,44469
174	2,0408	0,4481
175	2,0736	0,45153
176	2,1072	0,45498
177	2,1417	0,45844
178	2,1771	0,46192
179	2,2135	0,46542
180	2,2509	0,46895
181	2,2893	0,47249
182	2,3289	0,47604
183	2,3696	0,47962
184	2,4115	0,48322
185	2,4547	0,48684
186	2,4992	0,49048
187	2,5451	0,49414
188	2,5925	0,49783
189	2,6414	0,50153
190	2,6919	0,50525
191	2,7442	0,509
192	2,7982	0,51277
193	2,8542	0,51656
194	2,9121	0,52038
195	2,9722	0,52422
196	3,0345	0,52808
197	3,0993	0,53197
198	3,1665	0,53588
199	3,2364	0,53981
200	3,3092	0,54377

### Respon Dinamis Kondisi 3

Frekuensi (Hz)	amplitudo structural steel (mm/s)	amplitudo alluminium alloy (mm/s)
8	0,021981	0,021759
9	0,024733	0,024483
10	0,027486	0,027209
11	0,030242	0,029937
12	0,032999	0,032666
13	0,035759	0,035397
14	0,038521	0,038131
15	0,041285	0,040867
16	0,044053	0,043605
17	0,046823	0,046347
18	0,049596	0,049091
19	0,052372	0,051838
20	0,055152	0,054589

21	0,057935	0,057343
22	0,060722	0,060101
23	0,063513	0,062862
24	0,066309	0,065627
25	0,069108	0,068397
26	0,071913	0,071171
27	0,074721	0,073949
28	0,077535	0,076732
29	0,080354	0,07952
30	0,083179	0,082313
31	0,086009	0,085112
32	0,088844	0,087916
33	0,091686	0,090725
34	0,094533	0,09354
35	0,097387	0,096362
36	0,10025	0,099189
37	0,10311	0,10202
38	0,10599	0,10486
39	0,10887	0,10771
40	0,11176	0,11056
41	0,11465	0,11343
42	0,11756	0,1163
43	0,12047	0,11917
44	0,12339	0,12206
45	0,12632	0,12495
46	0,12926	0,12785
47	0,1322	0,13076
48	0,13516	0,13368
49	0,13812	0,1366
50	0,1411	0,13954
51	0,14408	0,14248
52	0,14707	0,14544
53	0,15008	0,1484
54	0,15309	0,15137
55	0,15612	0,15436
56	0,15915	0,15735
57	0,1622	0,16036
58	0,16526	0,16337
59	0,16833	0,1664
60	0,17141	0,16944
61	0,17451	0,17249
62	0,17761	0,17555
63	0,18073	0,17863
64	0,18387	0,18171
65	0,18701	0,18481
66	0,19017	0,18792

67	0,19335	0,19105
68	0,19653	0,19419
69	0,19974	0,19734
70	0,20295	0,20051
71	0,20619	0,20369
72	0,20943	0,20688
73	0,2127	0,21009
74	0,21598	0,21332
75	0,21927	0,21656
76	0,22258	0,21981
77	0,22591	0,22309
78	0,22926	0,22637
79	0,23262	0,22968
80	0,236	0,233
81	0,2394	0,23634
82	0,24282	0,2397
83	0,24625	0,24307
84	0,24971	0,24646
85	0,25319	0,24988
86	0,25668	0,25331
87	0,2602	0,25675
88	0,26373	0,26022
89	0,26729	0,26371
90	0,27087	0,26722
91	0,27447	0,27075
92	0,2781	0,2743
93	0,28174	0,27788
94	0,28541	0,28147
95	0,2891	0,28509
96	0,29282	0,28873
97	0,29656	0,29239
98	0,30033	0,29607
99	0,30412	0,29978
100	0,30794	0,30352
101	0,31178	0,30728
102	0,31565	0,31106
103	0,31955	0,31487
104	0,32348	0,31871
105	0,32743	0,32257
106	0,33142	0,32646
107	0,33543	0,33038
108	0,33947	0,33432
109	0,34354	0,3383
110	0,34765	0,3423
111	0,35178	0,34633
112	0,35595	0,3504

113	0,36015	0,35449
114	0,36439	0,35862
115	0,36866	0,36277
116	0,37296	0,36696
117	0,3773	0,37119
118	0,38167	0,37544
119	0,38608	0,37973
120	0,39053	0,38406
121	0,39502	0,38842
122	0,39954	0,39282
123	0,40411	0,39726
124	0,40871	0,40173
125	0,41336	0,40624
126	0,41805	0,41079
127	0,42278	0,41538
128	0,42755	0,42001
129	0,43237	0,42468
130	0,43724	0,4294
131	0,44215	0,43416
132	0,4471	0,43896
133	0,45211	0,4438
134	0,45716	0,44869
135	0,46227	0,45363
136	0,46742	0,45862
137	0,47263	0,46365
138	0,47789	0,46873
139	0,4832	0,47387
140	0,48857	0,47905
141	0,494	0,48428
142	0,49948	0,48957
143	0,50502	0,49492
144	0,51063	0,50032
145	0,51629	0,50577
146	0,52201	0,51128
147	0,5278	0,51685
148	0,53365	0,52249
149	0,53957	0,52818
150	0,54556	0,53393
151	0,55162	0,53975
152	0,55775	0,54564
153	0,56395	0,55159
154	0,57022	0,5576
155	0,57657	0,56369
156	0,583	0,56985
157	0,5895	0,57608
158	0,59609	0,58238

159	0,60276	0,58876
160	0,60951	0,59522
161	0,61635	0,60176
162	0,62328	0,60837
163	0,63029	0,61507
164	0,6374	0,62186
165	0,64461	0,62872
166	0,65191	0,63568
167	0,65931	0,64273
168	0,66681	0,64987
169	0,67442	0,6571
170	0,68213	0,66443
171	0,68995	0,67186
172	0,69789	0,67939
173	0,70594	0,68702
174	0,7141	0,69476
175	0,72239	0,7026
176	0,73079	0,71056
177	0,73933	0,71863
178	0,748	0,72682
179	0,75679	0,73512
180	0,76573	0,74355
181	0,7748	0,75211
182	0,78402	0,76079
183	0,79339	0,7696
184	0,80291	0,77855
185	0,81259	0,78764
186	0,82242	0,79687
187	0,83242	0,80624
188	0,84259	0,81576
189	0,85294	0,82544
190	0,86346	0,83527
191	0,87417	0,84527
192	0,88507	0,85543
193	0,89616	0,86576
194	0,90746	0,87627
195	0,91896	0,88696
196	0,93068	0,89783
197	0,94261	0,90889
198	0,95478	0,92015
199	0,96718	0,93161
200	0,97982	0,94327

## BIODATA PENULIS



M Farrel Baihaqi Rama dilahirkan di Pekanbaru, 24 November 1999 merupakan anak yang terlahir dari orangtua bernama Bapak Roviandi Rama dan Ibu Susyanti Eka Putri. Riwayat pendidikan penulis diawali di SD Al-Azhar Syifabudi Pekanbaru tahun 2005-2011, kemudian masuk SMPN 1 Pekanbaru selama 3 tahun dari tahun 2011-2014, dan SMAN 8 Pekanbaru dari tahun 2014-2017. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non akademik di lingkungan kampus Teknik Mesin FTIRS. Penulis pernah menjadi anggota Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) dalam periode kepengurusan 2018/2019 sebagai staff departemen Badan Semi Otonom Big Event. Pada periode kepengurusan 2019/2020, penulis menjadi sekretaris departemen dari Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) Fakultas Teknologi Industri Reayasa Sistem. Dan pada periode 2020/2021 penulis menjadi Ketua Komisi Kontrol Himpunan dari Dewan Presidium Mesin. Untuk kritik dan saran dari pembaca terkait penelitian ini, maupun hal lainnya dapat melalui kontak pada email [farrelbaihaqi21@yahoo.com](mailto:farrelbaihaqi21@yahoo.com)