



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISA STATIS DAN DINAMIS PADA *SINGLE SHAFT* MOTOR BLDC 1.5 KW MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD

RASYID MUTAZSIRAJ YOSSEFFANO
NRP 02111740000117

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021



TUGAS AKHIR – TM184835

**ANALISA STATIS DAN DINAMIS PADA SINGE SHAFT
MOTOR BLDC 1.5 KW MENGGUNAKAN FINITE
ELEMENT METHOD**

RASYID MUTAZSIRAJ YOSEFFANO
NRP 0211174000117

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021



FINAL PROJECT – TM184835

**STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF SINGLE SHAFT
MOTOR BLDC 1.5 KW USING FINITE ELEMENT
METHOD**

RASYID MUTAZSIRAJ YOSSEFFANO
NRP 0211174000117

Advising Lecturer:
Prof.Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

HALAMAN PENGESAHAN
ANALISA STATIS DAN DINAMIS PADA *SINGLE*
SHAFT MOTOR BLDC 1.5 KW MENGGUNAKAN
FINITE ELEMENT METHOD

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :



Rasvid Mutazsiraj Yosseffano
NRP. 0211174000117

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr.Eng Harus Laksana Gumtuh ST., M.Eng
NIP. 19750511 1999 031 001..... (Pembimbing)
2. Wiwiek Hendrowati, ST, MT, Dr.
NIP. 197004121887032003..... (Penguji I)
3. Aida Annisa Amir Laman, S¹, MT
NIP. 198907052015042005..... (Penguji II)
4. Ari Kurniawan Saputra
NIP. 198604012015041001..... (Penguji III)

SURABAYA

2021

ANALISA STATIS DAN DINAMIS PADA SINGE SHAFT MOTOR BLDC 1.5 KW MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD

Nama Mahasiswa : Rasyid Mutasiraj Yosseffano
NRP : 02111740000117
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Prof.Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

ABSTRAK

Masalah pencemaran lingkungan menjadi perhatian utama negara-negara di dunia saat ini. Salah satu sumber dari pencemaran lingkungan adalah penggunaan transportasi dengan bahan bakar fosil. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) menemukan bahwa emisi yang dihasilkan oleh bahan bakar fosil menjadi faktor penyebab yang paling dominan dari terjadinya global warming. Hal ini menjadi urgensi akan pentingnya inovasi pada kendaraan yang ramah lingkungan. Salah satu alternatif kendaraan yang ramah lingkungan adalah kendaraan listrik. Beberapa negara dunia sudah mulai melakukan investasi serta menyiapkan infrastruktur yang dapat menunjang transisi dari penggunaan kendaraan berbahan bakar fosil menuju kendaraan listrik. Salah satu tipe dari kendaraan listrik adalah skuter listrik. Penggunaan skuter listrik di Indonesia sudah cukup masif, terutama untuk jasa pesan antar makanan. Salah satu bagian dari Motor BLDC adalah bagian poros. Pada tugas akhir ini akan dilakukan perancangan ulang dari poros untuk motor BLDC 1.5KW yang akan di aplikasikan pada skuter listrik. Analisa yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah melihat respon poros yang telah dirancang ulang terhadap pembebanan statis dan pembebanan dinamis pada beberapa material.

Dalam penelitian ini akan dilakukan simulasi untuk pembebanan statis dan pembebanan dinamis pada Single Shaft. Pembebanan statis pada simulasi ini adalah berat maksimum kendaraan dengan

dua orang penumpang. Simulasi untuk pembebanan statis dilakukan dengan menggunakan analisa static structural pada ANSYS. Pembebanan dinamis untuk simulasi ini adalah power spectral density dari eksitasi jalan. Permodelan pembebanan dinamis dilakukan dengan menggunakan MATLAB Simulink. Variasi yang dilakukan adalah pada kecepatan kendaraan yang melewati suatu profil jalan. Variasi tersebut akan menjadi variable dalam melakukan simulasi pada software MATLAB Simulink untuk mengetahui besar power central density yang dihasilkan dari tiap variasi yang dilakukan. Hasil power central density akan menjadi input dalam melakukan simulasi random vibration pada Ansys. Respon poros yang dilihat dari simulasi pembebanan statis dan dinamis adalah deformasi dan equivalent stress. Variasi material dilakukan untuk mengetahui material dengan respon deformasi dan equivalent stress yang paing kecil

Dari hasil penelitian didapatkan bahwa power spectral density semakin tinggi seiring dengan bertambahnya kecepatan skuter listrik serta menurunnya kualitas jalan. Hal ini membuat deformasi dan equivalent stress yang lebih tinggi pada poros Ketika mendapatkan pembebanan dinamis di kecepatan skuter yang lebih tinggi serta kualitas jalan yang lebih buruk. Perbedaan modulus young dari kedua material menyebabkan perbedaan di respon statis dan dinamis dari poros skuter listrik, walaupun tidak terlalu signifikan karna kedua material masih dalam kelas material carbon steel. Rancangan poros skuter listrik masih aman digunakan pada kecepatan maksimum skuter listrik di kelas jalan dengan kategori kualitas very poor.

Kata kunci: InWheel Motor, Skuter Listrik, Single Shaft Motor, Beban Statis, Beban Dinamis, Analisa Struktur

STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF SINGLE SHAFT MOTOR BLDC 1.5 KW USING FINITE ELEMENT METHOD

Student Name : Rasyid Mutasiraj Yosseffano
Student ID : 02111740000117
Department : Mechanical Engineering of FTIRS –
ITS
Academic Advisor : Prof.Dr.Eng. Harus Laksana Guntur,
S.T., M.Eng.

ABSTRACT

The problem of environmental pollution is a major concern for countries in the world today. One source of environmental pollution is the use of transportation with fossil fuels. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) found that emissions produced by fossil fuels are the most dominant cause of global warming. This becomes the urgency of the importance of innovation in environmentally friendly vehicles. One alternative to environmentally friendly vehicles is electric vehicles. Several countries in the world have begun to invest and prepare infrastructure that can support the transition from using fossil fuel vehicles to electric vehicles. One type of electric vehicle is the electric scooter. The use of electric scooters in Indonesia is quite massive, especially for food delivery services. One part of the BLDC Motor is the shaft. In this final project, a redesign of the shaft for a 1.5KW BLDC motor will be carried out which will be applied to an electric scooter. The analysis carried out in this final project is to see the response of the redesigned shaft to static loading and dynamic loading on several materials.

In this study, simulations will be carried out for static loading and dynamic loading on Single Shaft. Static loading in this simulation is the maximum weight of a vehicle with two passengers. Simulations for static loading are carried out using static

structural analysis on ANSYS. Dynamic loading for this simulation is power central density of road excitation. Dynamic loading modeling is done using MATLAB Simulink. The variation made is on the speed of the vehicle that passes through a road profile. This variation will be a variable in performing simulations on the MATLAB Simulink software to determine the amount of power central density generated from each variation made. The results of power spectral density will be input in conducting random simulations vibration on Ansys. The shaft response seen from the simulation of static and dynamic loading is deformation and equivalent stress. Material variations are carried out to determine the material with the smallest deformation response and equivalent stress

From the results of the study, it was found that the power spectral density was higher as the speed of the electric scooter and the road quality decreased. This resulted in higher deformation and equivalent stress on the shaft when subjected to dynamic loading at higher scooter speeds and poorer road quality. The difference in Young's modulus of the two materials causes differences in the static and dynamic responses of the electric scooter shaft, although not too significant because the two materials are still in the carbon steel material class. The electric scooter shaft design is still safe to use at the maximum speed of electric scooters in the road class with the quality category. very poor.

Key words : InWheel Motor, Electric Scooter, Single Shaft Motor, Static Loading, Dynamic Loading, Structural Analysis

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb. Dengan penuh syukur penulis mengucapkan “Alhamdulillah” atas segala kenikmatan yang telah diberikah Allah swt sehingga tugas akhir dengan judul “**Analisa Statis Dan Dinamis Pada Single Shaft Motor BLDC 1.5 KW Menggunakan Finite Element Method**” dapat selesai sesuai dengan harapan penulis. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Irfan Yoseffano Nizardo dan Ibu Tengku Shaska Atiza yang selalu memberikan dukungan, doa dan segalanya kepada saya.
2. Prof. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dalam memberikan masukan dan saran dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc selaku kepala Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
4. Bapak Nur Ikhwan, ST.M.Eng.selaku dosen wali saya yang turut membantu saya dalam menyusun strategi mata kuliah yang akan diambil.
5. Bapak-Ibu dosen penguji yang telah memberikan saran serta masukan guna menyempurnakan Tugas Akhir ini dan Para Dosen Teknik Mesin ITS yang memberikan bimbingan kepada penulis.
6. Seluruh civitas akademika Departemen Teknik Mesin yang telah ramah kepada saya selama menempuh pendidikan di kampus yang tercinta.

7. Keluarga besar M60 selaku angkatan saya yang saya banggakan.
8. Keluarga Besar laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis yang sangat erat sekali kekeluargaannya.

Surabaya, 12 Juli 2021

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB 1.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB 2.....	7
TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Poros.....	7
2.2 Jenis Jenis Poros.....	7
2.3 Konsep Tegangan.....	9
2.4 Konsep Regangan.....	10
2.5 <i>Finite Element Method</i>	11

2.6	Meshing.....	12
2.7	Teori Analisa Modal.....	12
2.8	Teori Mekanika Getaran.....	13
2.8.1	Multidegree of Freedom.....	14
2.8.2	Base Motion Vibration.....	17
2.9	Kajian Pustaka Terdahulu.....	19
2.10	Transmibiitas Perpindahan	30
2.11	Transmibiitas Gaya.....	30
2.12	Random Vibration	31
2.13	Power Spectral Density	33
2.14	Fatigue.....	33
BAB 3.....		37
METODOLOGI PENELITIAN		37
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	37
3.1.1	Perumusan Masalah.....	39
3.1.2	Studi Literatur.....	39
3.1.3	Permodelan 3D Poros Motor BLDC 1.5 KW.....	39
3.1.4	<i>Material</i>	41
3.1.5	Permodelan Pembebanan Statis.....	42
3.1.6	Permodelan Pembebanan Dinamis Menggunakan Simulink Matlab.....	43
3.1.6.1	Model Dinamis Skuter Listrik	45

3.16.2 Pembuatan Blok Diagram Pada Matlab Simulink	47
3.1.6.3 Assign Parameters	48
3.1.6.4 Assign Solution	49
3.1.7 Pemodelan 3D Poros Motor BLDC 1.5 KW.....	50
3.1.7.1 Input Model 3 Dimensi.....	52
3.1.7.2 Assign Material	52
3.1.7.3 Assign Meshing Operation	53
3.1.7.4 Simulasi Static Structural.....	54
3.1.7.5.Simulasi Modal.....	55
3.1.7.6 Simulasi Random Vibration	56
BAB 4.....	59
PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN.....	59
4.1 Power Spectral Density Pada Kecepatan Skuter Listrik 40 Km/jam, 50 Km/jam, dan 60 Km/jam	59
4.3 Respon Poros Terhadap Pembebanan Statis Pada Material AISI 1020 dan AISI 1045	65
4.4 Hasil Simulasi Analisa Modal	67
4.5 Respon Poros Terhadap Pembebanan Dinamis Pada Variasi Kecepatan Skuter Listrik.....	68
4.6 Respon Poros Terhadap Pembebanan Dinamis Pada Variasi Kelas Jalan.....	71
4.7 Respon Poros Terhadap Pembebanan Dinamis Pada Variasi Material	73
4.8 Fatigue Life Poros Pada Pembebanan Dinamis.....	76

BAB 5.....	81
KESIMPULAN DAN SARAN.....	81
5.1 Kesimpulan.....	81
5.2 Saran.....	83
DAFTAR PUSTAKA.....	84
LAMPIRAN A.....	86
LAMPIRAN B.....	88
BIODATA PENULIS.....	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Poros.....	7
Gambar 2.2 Poros Transmisi.....	8
Gambar 2.3 <i>Spindle</i>	8
Gambar 2.4 Axle.....	9
Gambar 2.5 Distribusi Gaya Internal Pada Suatu Penampang.....	10
Gambar 2.6 (a) meshing dengan 294 elemen dan 344 node (b) meshing dengan 1008 elemen dan 1096 node.....	12
Gambar 2.7 Spring Mass Damper System.....	15
Gambar 2.8 (a) Base Excitation (b) Base Excitation Free Body Diagram.....	17
Gambar 2.9 Grafik Hubungan (a) Amplitudo Ratio dengan Frequency Ratio,(b)Phase Angle dengan Frequency Ratio.....	19
Gambar 2.10 Meshing Hexahedral.....	20
Gambar 2.11 <i>Boundaries Set Up</i>	21
Gambar 2.12 Instrumen SAVER3X90.....	22
Gambar 2.13 Penempatan Instrumen SAVER3X90 Pada Bodi Skuter Listrik.....	23
Gambar 2.14 <i>Power Spectral Density</i> Pada <i>Urban</i> dan <i>Inner City</i> <i>Road</i>	24
Gambar 2.15 Penempatan Instrumen Saver M30 Pada Kendaraan.....	26
Gambar 2.16 Permodelan Dinamis Kendaraan.....	28
Gambar 2.17 Power Spectral Density Pada Electric Wheel.....	29
Gambar 2.18 Respon Deformasi Struktur Wheel.....	29
Gambar 2.19 Grafik Variasi T_d dan ϕ terhadap r	30
Gambar 2.20 <i>Amplitude Time History</i> Pada Getaran Acak.....	32
Gambar 2.21 Proses PSD.....	34
Gambar 3.1 Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir.....	36
Gambar 3.2 Komponen Poros (a) Design awal (b)Re-Design (c) <i>Half Section View</i>	39
Gambar 3.3 Dimensi Poros.....	39

Gambar 3.4 <i>Material Properties</i> AISI 1020.....	40
Gambar 3.5 <i>Material Properties</i> AISI 1045.....	41
Gambar 3.6 Free Body Diagram Pembebanan Statis.....	42
Gambar 3.7 Flowchart Permodelan Beban Dinamis Dengan Matlab Simulink.....	43
Gambar 3.7 Model Dinamis Skuter Listrik.....	44
Gambar 3.8 <i>Free Body Diagram Sprung</i> <i>Mass</i>	45
Gambar 3.9 <i>Free Body Diagram Unsprung</i> <i>Mass</i>	45
Gambar 3.10 Block Diagram.....	46
Gambar 3.11 Block Parameters.....	47
Gambar 3.12 <i>Assign Solutions</i>	48
Gambar 3.13 Flowchart Permodelan <i>Finite Element Method</i>	49
Gambar 3.14 Input 3D Model.....	51
Gambar 3.15 <i>Material Properties</i>	52
Gambar 3.16 <i>Orthognal Quality Metrics</i>	53
Gambar 3.17 Boundaries Set Up Simulasi Static Structural.....	54
Gambar 3.18 Analisis Setting Analisa Modal.....	54
Gambar 3.19 <i>Boundaries Set Up Simulasi Random Vibration</i>	55
Gambar 4.1 <i>Power Spectral Density</i> Pada Kecepatan 20 Km/jam.....	59
Gambar 4.2 <i>Power Spectral Density</i> Pada Kecepatan 40 Km/jam.....	59
Gambar 4.3 <i>Power Spectral Density</i> Pada Kecepatan 60 Km/jam.....	60
Gambar 4.4 <i>Power Spectral Density</i> Pada Variasi Kecepatan	
Gambar 4.5 <i>Power Spectral Density</i> Pada Kelas Jalan C.....	61
Gambar 4.6 <i>Power Spectral Density</i> Pada Kelas Jalan D.....	62
Gambar 4.7 <i>Power Spectral Density</i> Pada Kelas Jalan E.....	63
Gambar 4.8 <i>Power Spectral Density</i> Pada Variasi Kelas Jalan.....	64
Gambar 4.9 Deformasi Poros AISI 1020 Static Structural.....	65
Gambar 4.10 Deformasi Poros AISI 1045 Static Structural.....	66
Gambar 4.11 <i>Equivalent Stress</i> Simulasi Static Structural.....	65

Gambar 4.12 Deformasi Pada Frekuensi Natural.....	66
Gambar 4.13 Mode Shape dan Frekuensi Natural.....	67
Gambar 4.14 Deformasi Maksimum Pada Variasi Kecepatan Skuter Listrik.....	68
Gambar 4.15 Equivalent Stress Maksimum Pada Variasi Kecepatan Skuter Listrik.....	69
Gambar 4.16 Deformasi Maksimum Pada Variasi Kelas Jalan.....	70
Gambar 4.17 <i>Equivalent Stress</i> Maksimu Pada Variasi Kelas Jalan.....	71
Gambar 4.18 Respon Dinamis Poros AISI 1020 a) Deformasi b) <i>Equivalent Stress</i>	73
Gambar 4.19 Respon Dinamis Poros AISI 1045 a) Deformasi b) <i>Equivalent Stress</i>	74
Gambar 4.20 <i>Fatigue Life</i> Poros Pada Kecepatan 20 km/jam.....	75
Gambar 4.21 <i>Fatigue Life</i> Poros Pada Kecepatan 40 Km/jam.....	75
Gambar 4.22 <i>Fatigue Life</i> Poros Pada Kecepatan 60 Km/jam.....	76
Gambar 4.23 <i>Fatigue Life</i> Poros Pada Variasi Kecepatan.....	77

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Material Properties dari Mild Steel Grade dan GlassFiber Epoxy Resin.....	20
Tabel 2.2 Deformasi dan Equivalent Stress Pada Material Composite dan Mild Steel Grade.....	21
Tabel 2.3 Konfigurasi SAVER 3X-90.....	23
Tabel 2.4 Power Spectral Density Arah Vertikal Pada Beberapa Kendaraan di Indonesia dan Thailand.....	26
Tabel 3.1 Road Class.....	42
Tabel 3.2 Uji Konvergensi.....	47

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Masalah pencemaran lingkungan menjadi perhatian utama negara-negara di dunia saat ini. Salah satu sumber dari pencemaran lingkungan adalah penggunaan transportasi dengan bahan bakar fosil. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) menemukan bahwa emisi yang dihasilkan oleh bahan bakar fosil menjadi faktor penyebab yang paling dominan dari terjadinya *global warming*. Pada tahun 2018, 89 persen dari emisi CO₂ global berasal dari bahan bakar fosil.

Hal ini menjadi urgensi akan pentingnya inovasi pada kendaraan yang ramah lingkungan. Kendaraan yang ramah lingkungan menjadi salah fokus utama dalam pengembangan teknologi transportasi dunia saat ini, baik kendaraan roda dua maupun roda empat. Salah satu alternatif kendaraan yang ramah lingkungan adalah kendaraan listrik. Beberapa negara dunia sudah mulai melakukan investasi serta menyiapkan infrastruktur yang dapat menunjang transisi dari penggunaan kendaraan berbahan bakar fosil menuju kendaraan listrik. Salah satu tipe dari kendaraan listrik adalah skuter listrik. Penggunaan skuter listrik di Indonesia sudah cukup masif, terutama untuk jasa pesan antar makanan. Melihat peluang pasar yang ada, Institut Teknologi Sepuluh Nopember mencoba untuk membuat skuter listrik dengan kualitas yang baik dan harga yang lebih terjangkau bagi masyarakat.

Komponen yang paling penting dari sebuah skuter listrik terdapat di bagian roda. Pada bagian roda skuter listrik terdapat motor BLDC (*Brushless Direct Current Electric Motor*). Salah satu bagian dari Motor BLDC adalah bagian poros. Pada tugas akhir ini akan dilakukan perancangan ulang dari poros untuk motor BLDC 1.5KW yang akan di aplikasikan pada skuter listrik. *Poros*

harus didesain kokoh, kuat, serta mampu tahan terhadap guncangan. Syarat utama yang harus dipenuhi adalah desain *poros* harus memiliki kekuatan untuk menopang beban kendaraan dengan tetap *rigid* dan tidak mengalami *bending* atau deformasi yang berlebihan terhadap pembebanan statis dan dinamis yang berlaku. Analisa yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah melihat respon poros yang telah dirancang ulang terhadap pembebanan statis dan dinamis pada beberapa material. Respon poros yang dilihat adalah deformasi dan *equivalent stress*. Respon poros dari pembebanan statis akan didapatkan dari simulasi static structural pada ANSYS. Untuk respon dari pembebanan dinamis, didapatkan dari simulasi *Random Vibration* pada ANSYS.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana rancangan ulang poros skuter listrik yang dapat menahan beban statis dan beban dinamis untuk motor BLDC 1.5 KW ?
2. Bagaimana deformasi dan tegangan dari desain poros skuter listrik saat dikenai pembebanan statis?
3. Bagaimana mencari frekuensi natural dan mode shape dari desain poros skuter listrik?
4. Bagaimana deformasi dan tegangan dari desain poros skuter listrik saat dikenai pembebanan dinamis dari beban kendaraan dan eksitasi jalan?
5. Apa material yang cocok untuk desain poros skuter listrik yang telah dirancang ulang?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Untuk mengetahui rancangan ulang poros skuter listrik yang dapat menahan beban statis dan dinamis pada motor BLDC 1,5KW
2. Mengetahui deformasi dan tegangan pada poros setelah mendapat pembebanan statis
3. Mengetahui frekuensi natural dan mode shape dari desain

poros skuter listrik

4. Mengetahui deformasi dan tegangan dari desain poros skuter listrik saat dikenai pembebanan dinamis dari beban kendaraan dan eksitasi jalan
5. Mengetahui material yang cocok untuk poros skuter listrik yang telah dirancang ulang?

1.4 Batasan Masalah Penelitian

Batasan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Beban statis yang digunakan adalah massa dari e-scooter dan dua orang penumpang
2. Beban dinamis yang digunakan merupakan beban eksitasi dari jalan
3. Material yang digunakan pada penelitian kali ini adalah AISI 1020 dan AISI 1045
4. Untuk mendapatkan Power Centra Density akibat dari eksitasi jalan dengan menggunakan software Simulink matlab dengan permodelan setengah kendaraan
5. Parameter yang digunakan berdasarkan jurnal
6. Profil jalan yang digunakan menggunakan standard ISO 8680

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai inovasi yang dapat menjadi masukan bagi produsen dan industri-industri dalam pengembangan poros skuter listrik. Dengan inovasi ini diharapkan kedepannya dapat membantu masyarakat dalam mengurangi masalah yang sering terjadi pada *electric motor shaft* serta meningkatkan efisiensi pada kendaraan mobil listrik.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Poros

Poros merupakan suatu bagian stationer yang berputar, biasanya berpenampang bulat dimana terpasang elemen-elemen seperti roda gigi (gear), pullet flywheel, engkol, sprocket dan elemen pemindahan lainnya. Poros bisa menerima beban lenturan, beban tarikan beban tekan atau beban puntiran yang bekerja sendiri-sendiri atau berupa gabungan satu dengan lainnya. (Josep Edward Shigley, 1983)



Gambar 2.1 Poros

Gambar 2.1 menunjukkan poros dalam sebuah mesin yang berfungsi untuk meneruskan tenaga dan putaran. Setiap elemen mesin yang berputar, seperti cakaran tali, puli sabuk mesin, piringan kabel, tromol kabel, roda jalan dan roda gigi dipasang berputar terhadap poros dukung yang tetap atau dipasang tetap pada poros dukung yang berputar.

2.2 Jenis Jenis Poros

-Berdasarkan Jenis Pembebanannya

a. Poros transmisi



Gambar 2.2 Poros Transmisi

Poros transmisi seperti pada gambar 2.2 berfungsi untuk memindahkan tenaga mekanik salah satu elemen mesin ke elemen mesin yang lain. Poros transmisi mendapatkan beban puntir murni atau puntir dan lentur yang akan meneruskan daya ke poros melalui kopling, roda gigi, puli sabuk, sprocket rantai dan lain-lain. Poros ini memindahkan tenaga antara sumber dan mesin yang menyerap tenaga.

b. Spindle



Gambar 2.3 Spindle

Gambar 2.3 menunjukkan poros dengan jenis *spindle*. *Spindle* merupakan poros transmisi yang relatif pendek dimana beban utamanya berupa puntiran yang disebut sebagai *spindle*. Syarat

yang harus dipenuhi poros ini adalah deformasinya harus kecil dan bentuk serta ukurannya harus teliti.

c. Axle

Axle seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4 merupakan poros yang tidak mendapatkan beban punter. Fungsi dari gandar hanya sebagai penahan beban karena gandar merupakan suatu poros yang tidak berputar. Contohnya seperti yang dipasang pada roda-roda kereta barang, atau pada as truk bagian depan



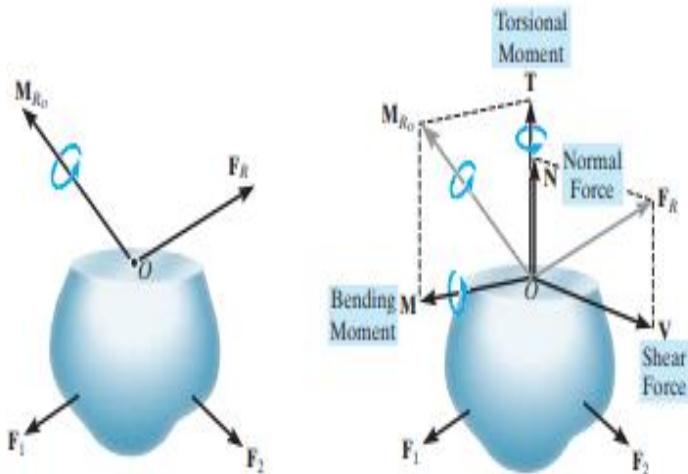
Gambar 2.4 Axle

2.3 Konsep Tegangan

Ketika permukaan internal diisolasi, gaya total dan momen yang bekerja pada permukaan akan memanifestasikan dirinya sebagai distribusi gaya di seluruh area. Distribusi gaya yang bekerja pada suatu titik di permukaan adalah unik dan akan memiliki komponen di dalamnya, yang bekerja ke arah normal disebut dengan tegangan normal dan yang bekerja ke arah tangensial disebut dengan tegangan tangensial. Tegangan normal dan tegangan geser diberi label dengan simbol Yunani σ dan τ .

Jika arah σ keluar dari permukaan maka itu adalah tensile stress yang merupakan tegangan normal positif. Jika σ masuk ke permukaan, itu adalah tegangan tekan yang merupakan tegangan normal negatif. Satuan standar internasional untuk tegangan dalam

newton per meter persegi (N / m^2). Gambar 2.5 dibawah ini menunjukkan distribusi gaya internal pada suatu penampang.



Gambar 2.5 Distribusi Gaya Internal Pada Suatu Penampang

2.4 Konsep Regangan

Regangan merupakan perubahan bentuk per satuan panjang pada suatu batang. Semua bagian bahan yang mengalami gaya-gaya luar, dan selanjutnya tegangan internal akan mengalami perubahan bentuk. Misalnya di sepanjang batang yang mengalami suatu beban tarik aksial akan teregang atau diperpanjang, sementara suatu kolom yang menopang suatu beban aksial akan tertekan atau diperpendek. Total deformasi yang dihasilkan suatu batang dinyatakan dengan huruf Yunani δ (delta). Jika panjang batang adalah L , regangan (perubahan bentuk per satuan panjang) dinyatakan dengan huruf Yunani ϵ (epsilon), maka:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.1)$$

Dimana,

ε =Regangan

δ =total deformasi pada suatu batang

L= Panjang batang

2.5 Finite Element Method

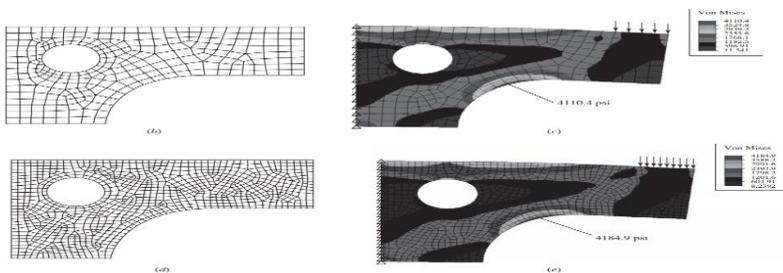
Finite Element Method atau yang biasa disebut metode elemen hingga adalah salah satu metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan engineering dengan metode numerik yang memanfaatkan operasi matriks untuk menyelesaikan masalah-masalah fisik. Selain itu dapat juga menggunakan metode analitik, untuk menyelesaikannya diperlukan persamaan matematik yang merupakan model dari perilaku fisik. Tetapi jika bentuk geometri sangat rumit dan tidak memungkinkan membangun model matematis yang dapat mewakili permasalahan tersebut dapat menggunakan metode yang lain dengan cara membagi obyek analisa menjadi bagian bagian kecil dengan jumlah hingga (finite). Bagian-bagian kecil itu disebut elemen dimana tiap-tiap elemen dihubungkan dengan nodal. Kemudian dibangun persamaan matematika yang merepresenasikan benda yang akan dianalisis. Proses benda. Berdasarkan variable ukur terhadap waktu, analisis *Finite Element Method* dapat dibedakan menjadi dua yaitu statis dan dinamis.

Finite Element Method banyak digunakan untuk menghitung struktur yang diakibatkan pembebanan ataupun pengaruh lain pada struktur sehingga menyebabkan terjadinya regangan yang juga disertai tegangan dalam dan reaksi titik

tertahan. Tujuan utamanya adalah untuk memperoleh nilai pendekatan (bukan eksak) tegangan dan regangan yang terjadi pada suatu struktur, pendekatan dengan elemen hingga merupakan suatu analisa berdasarkan asumsi tegangan atau regangan, bahkan juga berdasarkan kombinasi dua asumsi tadi dalam setiap elemennya.

2.6. 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 satu 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 dengan mulus. Secara umum, semakin tinggi kualitas *meshing* maka analisa *finite element* yang dilakukan akan lebih akurat. Contoh *mesh* elemen ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 (a) meshing dengan 294 elemen dan 344 node (b) meshing dengan 1008 elemen dan 1096 node (Shigley, 2011)

2.7. Teori Analisis Modal

Analisis modal adalah suatu proses yang ditujukan untuk menentukan karakteristik - karakteristik dinamik dari suatu sistem struktur. Dimana karakteristik - karakteristik tersebut adalah frekuensi natural, mode getar, dan rasio redam.

Selain menentukannya, analisa modal juga mencakup penggunaan karakteristik - karakteristik tersebut untuk memformulasikan suatu model matematis dari perilaku dinamik suatu sistem struktur yang kita tinjau (Fu, 2001).

Mempertimbangkan efek dinamik dalam pembuatan desain juga cukup penting. Dengan menggunakan analisa modal, akan dapat diketahui bagaimana karakteristik dinamik. Analisa modal adalah analisa linear yang tidak memanfaatkan eksitasi atau beban. Mode frekuensi hanya bergantung terhadap dua variabel, yaitu kekakuan dan massa. Analisa modal memberikan informasi bagaimana desain struktur tersebut merespon tipe-tipe yang berbeda dari beban dinamik dan dapat digunakan contohnya untuk menghindari resonansi getaran yang dapat membahayakan struktur. Itulah mengapa analisa modal merupakan analisa fundamental untuk semua analisa dinamik. Analisa modal juga merupakan dasar dari analisa dinamis linear lainnya seperti respon harmonik dan *random vibration*. Berikut adalah cara bagaimana frekuensi natural dan *mode shapes* dapat dikalkulasi. Persamaan gerak linear untuk *free undamped vibration* adalah :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (2.6)$$

Dimana $[M]$ adalah matriks massa, $\{\ddot{u}\}$ adalah percepatan, $[K]$ adalah matriks kekakuan, dan $\{u\}$ adalah perpindahan. Dengan mengasumsikan gerak harmonik, vektor percepatan dan perpindahan dapat diwakilkan dengan dua persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned} \{u\} &= \{\emptyset\}_i \sin(\omega_i t + v_i) \\ \{\ddot{u}\} &= \omega_i^2 \{\emptyset\}_i \sin(\omega_i t + v_i) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Setelah itu substitusikan persamaan percepatan dan perpindahan ke persamaan gerak linear, sehingga didapat eigenvalue problems sebagai berikut:

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\emptyset\}_i = \{0\} \quad (2.8)$$

Selesaikan bagian pertama $([K] - \omega_i^2 [M])$, maka akan didapatkan frekuensi natural. Kemudian selesaikan bagian kedua, akan didapatkan mode shapes $\{\emptyset\}_i$. *Eigenvalue* adalah hasil kuadrat dari frekuensi natural (ω_i^2). Sedangkan *eigenvector* adalah *mode*

shapes atau mode getar dari struktur. Frekuensi natural (f_i) dapat dihitung menggunakan rumus :

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (2.9)$$

2.8 Teori Mekanika Getaran

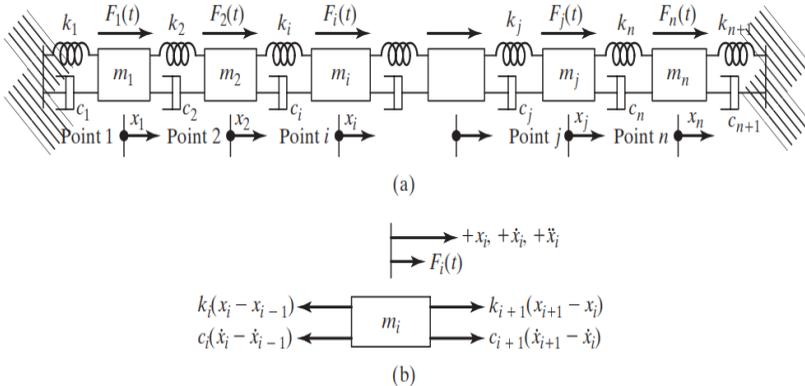
Getaran dapat didefinisikan sebagai gerakan bolak-balik dalam suatu interval waktu tertentu. Benda yang bergetar akan cenderung menyimpang dari sumbunya. Getaran berhubungan dengan gerak osilasi benda dan gaya yang berhubungan dengan gerak tersebut. Getaran dibagi menjadi dua kelompok umum, yaitu getaran bebas dan getaran paksa. Getaran bebas merupakan getaran yang terjadi pada suatu benda dimana benda tersebut diberikan gaya eksitasi awal, kemudian benda dibiarkan bergetar bebas. Seperti getaran yang terjadi pada bandul ketika dia diberi gaya eksitasi berupa tarikan kemudian dilepaskan. Sedangkan getaran paksa merupakan getaran yang terjadi pada benda, dimana gerakannya diterapkan pada suatu sistem mekanis. Contohnya getaran pada komponen mesin yang disebabkan oleh putaran motor. Setiap komponen yang memiliki massa dan pegas berarti memiliki frekuensi natural. Frekuensi natural inilah yang akan mempengaruhi respon getaran dari suatu sistem. Pada penelitian tugas akhir ini menggunakan teori mekanika getaran sebagai landasan dan literatur. Adapun subbab yang akan dibahas antara lain mengenai *Multi Degree of Freedom*, *Base Motion Vibration*, dan *Dynamic Vibration Absorber*.

2.8.1 *Multi Degree of Freedom*

Degree of Freedom adalah jumlah koordinat minimum yang diperlukan untuk menggambarkan gerakan suatu sistem. *Degree of Freedom* bersifat independen. *Degree of Freedom* juga diperlukan untuk menentukan posisi dari suatu bagian sistem yang akan dianalisa. Dalam bidang *engineering*, hampir semua sistem memiliki lebih dari satu derajat kebebasan (*Degree of Freedom*),

sehingga dapat disebut dengan sistem *Multi Degree of Freedom*. Setiap derajat kebebasan memiliki frekuensi naturalnya

masing-masing. Gambar 2.7 berikut ini merupakan contoh sistem multi DOF:



Gambar 2.7 Spring-Mass-Damper System (Rao, 2011)

Persamaan gerak yang digunakan untuk MDOF secara umum diturunkan dari Hukum Newton kedua. MDOF menggunakan persamaan mantriks untuk merepresentasikan sistem karena memiliki penyelesaian aljabar yang kompleks. Dari gambar 2.7 diatas, maka dapat diturunkan persamaan gerak menggunakan Hukum Newton kedua yang diberikan untuk setiap masa sebagai berikut:

$$m_i \ddot{x}_i + k_i x_i + c_i \dot{x}_i = \sum_j F_{ij} \quad (2.10)$$

Persamaan gerak 2.1 dapat diturunkan untuk m_1 dan m_n menjadi persamaan berikut:

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = F_1 \quad (2.11)$$

$$m_n \ddot{x}_n + (c_n + c_{n+1}) \dot{x}_n - c_n \dot{x}_{n-1} + (k_n + k_{n+1}) x_n - k_n x_{n-1} = F_n \quad (2.12)$$

Persamaan 2.1 hingga 2.2 dapat digambarkan sebagai matrix sebagai berikut:

$$[m]\ddot{\vec{x}} + [c]\dot{\vec{x}} + [k]\vec{x} = \vec{F} \quad (2.13)$$

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

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & m_n \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & (c_3 + c_4) & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -c_n & (c_n + c_{n+1}) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_n & (k_n + k_{n+1}) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

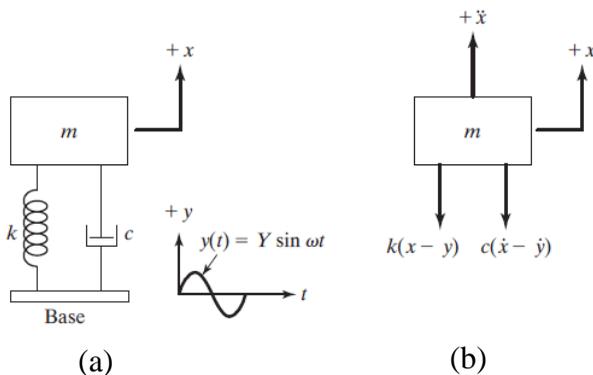
x , \dot{x} , \ddot{x} , dan \vec{F} adalah perpindahan, kecepatan, percepatan, dan vector gaya, sebagai berikut:

$$\vec{x} = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{Bmatrix}, \quad \dot{\vec{x}} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) \end{Bmatrix}, \quad \ddot{\vec{x}} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_n(t) \end{Bmatrix}, \quad \vec{F} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ \vdots \\ F_n(t) \end{Bmatrix} \quad (2.17)$$

2.8.2 Base Motion Vibration

Base motion vibration 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 2.8 (a) merupakan skema sistem dinamis base motion vibration, sedangkan gambar 2.8 (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 adalah dan kecepatan relatif dari *damper* adalah $\dot{x} - \dot{y}$. (Rao, 2011)



Gambar 2.8 (a) Base Excitation (b) Base Excitation Free Body Diagram (Rao, 2011)

Dari gambar diatas diperoleh persamaan gerak sebagai berikut:

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

Jika $y(t) = Y\sin\omega t$ maka persamaan (2.9) menjadi:

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

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

$$x_p(t) = \frac{Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{(k - (m\omega)^2)^2 + m\omega^2}} \sin(\omega t - \phi_1 - \alpha) \quad (2.20)$$

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

Dimana, Menggunakan identitas trigonometri persamaan dapat ditulis sebagai berikut :

Dengan

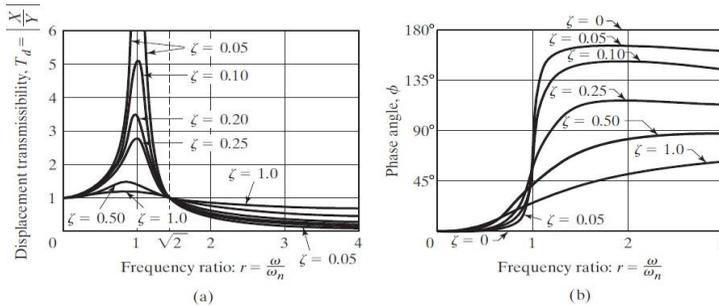
$$x_p(t) = X \sin(\omega t - \phi) \quad (2.22)$$

Dimana nilai X dan ϕ_1 didapat dari

$$\frac{X}{Y} = \frac{\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{((k - (m\omega)^2)^2 + m\omega^2)} \quad (2.23)$$

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

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



Gambar 2.9 Grafik Hubungan (a) *Amplitudo Ratio* dengan *Frequency Ratio*, (b) *Phase Angle* dengan *Frequency Ratio* (Rao, 2011)

Gambar 2.9 di atas menunjukkan grafik hubungan *displacement transmissibility* dan sudut fase dengan rasio frekuensi pada sistem *base motion vibration*.

2.9 Kajian Pustaka Terdahulu

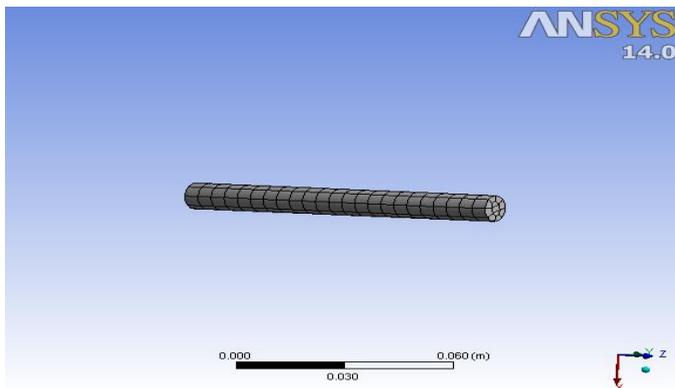
Penelitian sebelumnya yang dapat dijadikan sebagai referensi dalam mengerjakan Tugas Akhir ini yaitu milik Rajlalan Agnihotri dan Astuhosh Dwivedi dari *Vindhya Institute of Technology and Science Satna (M.P.) India* berupa *Finite Element Analysis For Front Axle Of Two-Wheeler company- case of Algeria*. Penelitian ini berupa analisa finite element method pada poros roda dua dengan material komposit dan mild steel grade 300 menggunakan software ansys. Untuk studi ini, poros roda dua yang terbuat dari baja kelas ringan (300) digantikan oleh material komposit yang terbuat dari resin epoxy serat gelas yang diharapkan dapat memberikan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan material mild steel grade 300. Dalam hal ini, berbagai tekanan diperiksa melalui perangkat lunak Ansys 14.0 lalu akan dilihat perbedaan antara material komposit dan mild steel grade 300. Berikut material properties dari mild steel grade 300 dan glass

fiber epoxy resin ditunjukkan pada tabel 2.1.

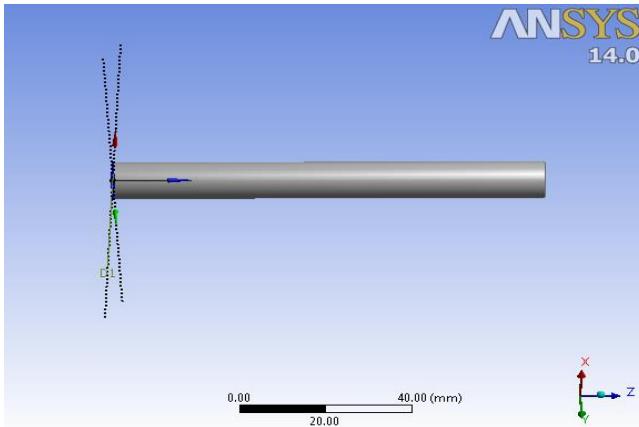
Tabel 2.1 Material Properties dari Mild Steel Grade dan Glass Fiber Epoxy Resin

Mild Steel grade (300)		Glass fiber epoxy resin	
Yield Stress	Tensile Strength	Yield Stress	Tensile Strength
835.57 (N/mm ²)	938.47 (N/mm ²)	362.38 (N/mm ²)	699.44 (N/mm ²)

Pada penelitian ini digunakan simulasi Static Structural pada Ansys. Langkah yang dilakukan yaitu melakukan pemilihan material, input geometry, meshing, dan menentukan output dari simulasi static structural.. Material yang akan di-input adalah material mild steel grade dan material komposit. Setelah pemilihan material dilakukan proses meshing. Tipe meshing yang dipilih pada simulasi ini adalah mesihing tipe hexahedral seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10. Gambar 2.11 menunjukkan boundaries yang ditentukan pada simulasi ini yaitu pemilihan *fixed support* di bagian face cylinder pada salah satu ujung poros



Gambar 2.10 Meshing Hexahedral



Gambar 2.11 Bounderies Set Up

Output pada simulasi static structural ini yaitu melihat *Max Principal Stress*, *Equivalent(Von-Mises) Stress*, *Maximum Shear Stress* dan *Directional Deformation* pada poros dengan material steel grade dan komposit.

Tabel 2.2 Deformasi dan Stress Pada Material Mild Steel Grade dan Composite

Stress/ Deformation	Mild Steel Grade (300)	Composite
Max Principal Stress (pascal)	1.7137e7	1.0622e6
Equivalent(Von-Mises) Stress(pascal)	1.396e7	1.0949e7
Max Shear Stress(pascal)	7.3332e6	5.8878e6
Directional Deformation (micron)	0.09	0.07

Tabel 2.2 menunjukkan deformasi dan *stress* pada material *mild steel grade* dan komposit. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa material komposit memiliki *mechanical properties* yang lebih baik dibanding material Mild Steel Grade 300. Hal ini dapat dilihat dari deformasi dan tekanan yang lebih rendah pada material komposit. Selain itu, kelebihan dari penggunaan material komposit adalah material yang lebih ringan serta ekonomis.

Penelitian kedua adalah penelitian yang dilakukan oleh Hao Zhou dan Zhi-Wei Wang dari *Packaging Engineering Institute, Jinan University, China*. Penelitian ini berupa eksperimen yang dilakukan untuk mengetahui respon *power spectral density* pada beberapa kendaraan logistik yang melintasi suatu jalan. Salah satu kendaraan yang dijadikan eksperimen di penelitian ini adalah skuter listrik roda dua. Eksperimen untuk melihat respon *power central density* pada skuter listrik dilakukan pada dua tipe jalan, yaitu urban road di Thailand serta Inner City Road di China. Metodologi pada eksperimen ini yaitu dengan menempatkan instrumen SAVER 3X90 pada bodi kendaraan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13. Sinyal getaran dari perjalanan dengan jenis jalan raya yang berbeda dan kecepatan perjalanan direkam oleh SAVER 3X90. Gambar 2.12 menunjukkan instrumen SAVER 3X90.



Gambar 2.12 Instrumen SAVER 3X90



Gambar 2.13 Penempatan SAVER 3X90 Pada Bodi Skuter Listrik

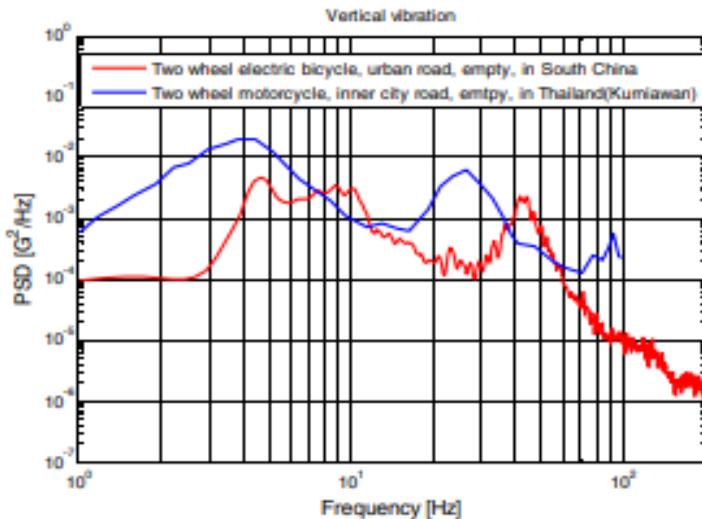
Parameter yang diinput pada instrument SAVER 3X90 ditunjukkan pada tabel 2.3

Tabel 2.3 Konfigurasi SAVER 3X90

Signal Triggered Data	
Samples/Second	1000 Hz
Sample size	2000
Signal record time	2 seconds
Signal Pre Trigger	50%
Signal Triggered Threshold Level	0.5 G
Filter Frequency Setting	500 Hz
Full Scale	50 G
Data retention mode	fill/stop
Memory Allocation	4902 events
Time Triggered Data	
Samples/Second	1000 Hz

Sample size	2000
Signal record time	2 seconds

Setelah dilakukan perjalanan selama lebih dari 30 menit pada kecepatan 30 km/jam didapatkan respon *power spectral density* dalam satuan G^2/Hz dari getaran ke arah vertikal pada dua profil jalan yang berbeda seperti ditunjukkan pada gambar



Gambar 2.14 Power Spectral Density Pada Urban dan Inner City Road

Dari gambar 2.14 dapat dilihat bahwa *power spectral density* tertinggi terdapat pada rentang frekuensi rendah (1-10 Hz) pada skuter listrik roda dua pada urban road di China maupun pada inner city road di Thailand. *Power spectral density* pada urban road di China lebih rendah dibandingkan *power central density* pada inner city road di Thailand. Hal ini dikarenakan kualitas jalan pada urban road di china masih lebih baik daripada di inner city road Thailand sehingga eksitasi jalan jalan yang berlaku pun lebih kecil.

Penelitian ketiga adalah penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Prasetya Kurniawan, Vanee Chonhenchob, Sher Paul Singh dan Sukasem Sittipod dari Department of Packaging and Materials Technology, Kasetsart University, Bangkok, Thailand. Penelitian ini berjudul *Measurement and Analysis of Vibration Levels in Two and Three Wheel Delivery Vehicles in Southeast Asia*. Penelitian ini berupa eksperimen yang dilakukan untuk mengukur serta menganalisa tingkat getaran pada beberapa kendaraan logistik yang ada di Indonesia dan Thailand. Penelitian ini juga dimaksudkan untuk kualitas jasa pengiriman paket yang lebih baik pada kendaraan roda dua dan kendaraan roda tiga di Indonesia dan Thailand. Memiliki akses data dinamika distribusi dari berbagai transportasi dan penanganan kondisi menawarkan informasi yang berguna untuk desain dan pengujian paket untuk mengurangi kerusakan, klaim, dan ketidakpuasan pelanggan.

Perekam data (Saver® 3 M30 Plus, Lansmont Corporation, Monterey, CA, USA), dengan triaksial internal Akselerometer digunakan dalam penelitian ini untuk mengukur tingkat getaran untuk gerakan lateral, longitudinal dan vertikal pada kendaraan kecil yang diuji dalam penelitian ini. Alat perekamnya langsung ditempelkan ke bagian tempat produk dan paket dimuat untuk pengiriman. Instrumen diikat pada pelat logam yang kaku sebelum dipasang pada logam pembawa beban. Gambar 2.15 menunjukkan penempatan instrumen Saver M30 pada kendaraan roda dua di Indonesia.

Pengukuran getaran dilakukan untuk total delapan kendaraan kecil yang berbeda di Thailand dan Indonesia. Lima dari rute paling umum dipilih untuk setiap jenis kendaraan. Di keduanya, Thailand dan Indonesia, sebagian besar rutenya



Gambar 2.15 Penempatan Instrumen Saver M30 Pada Kendaraan

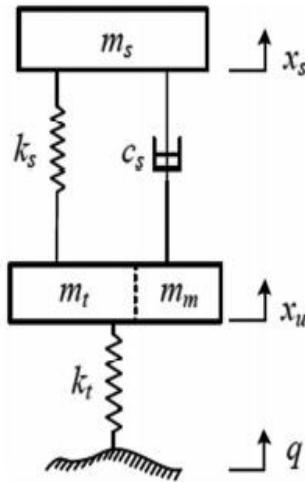
berupa jalan dalam kota, dimana kondisi jalannya saat itu terawat dengan baik serta perlengkapan sepeda motor yang digunakan. Kecepatan operasi kendaraan adalah a 5–50 km / jam. Setelah itu didapatkan respon power central density ke arah vertical seperti ditunjukkan pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Power Spectral Density Arah Vertikal Pada Beberapa Kendaraan di Indonesia dan Thailand

Spectrum number	Frequency (Hz)	Power density (G^2/Hz)							
		Tuk Tuk	Tossa	Side car TH	Side car ID	Viar	Becak	Motorcycle PI	Motorcycle AI
1	1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0005
2	4	0.0005	0.0003	0.0006	0.0004	0.0007	0.0008	0.0022	0.0186
3	5	0.0006	0.0005	0.0006	0.0011	0.0014	0.0018	0.0025	0.0152
4	7	0.0002	0.0009	0.0015	0.0010	0.0031	0.0011	0.0026	0.0033
5	10	0.0003	0.0011	0.0037	0.0006	0.0031	0.0003	0.0024	0.0010
6	12	0.0004	0.0019	0.0025	0.0003	0.0021	0.0002	0.0026	0.0007
7	17	0.0003	0.0026	0.0081	0.0005	0.0006	0.0002	0.0016	0.0007
8	50	0.0001	0.0007	0.0009	0.0001	0.0002	0.0001	0.0002	0.0003
9	70	0.0002	0.0002	0.0010	0.0001	0.0001	0.0017	0.0005	0.0001
10	80	0.0014	0.0002	0.0014	0.0001	0.0001	0.0065	0.0012	0.0001
11	100	0.0003	0.0002	0.0008	0.0002	0.0001	0.0004	0.0009	0.0002

Pada daerah frekuensi rendah (1–10 Hz) level PD tertinggi terjadi pada 4–5 Hz pada sepeda motor roda dua berbatang aluminium diikuti oleh sepeda motor roda dua berbatang plastik. Rentang frekuensi rendah dengan akselerasi tinggi ini dapat mengakibatkan perpindahan yang besar dan pergeseran produk selama pengangkutan. Di wilayah frekuensi tinggi (10–100 Hz), level getaran tertinggi berbeda di semua kendaraan, mewakili struktur dan kecepatan kendaraan yang berbeda-beda. Tingkat getaran tertinggi yang berada di wilayah frekuensi tinggi terjadi pada frekuensi 20–30 Hz di sepeda motor roda dua dengan wadah aluminium dan bagasi plastik dan pada 10–20 Hz di sepeda motor roda dua dengan mobil samping yang digunakan di Thailand. Wilayah frekuensi ini merepresentasikan respons ban dan respons struktural wadah kendaraan. Tingkat getaran berbeda di wilayah frekuensi yang lebih tinggi (50–70 Hz) merepresentasikan respon struktural berbagai kendaraan yang berbeda.

Penelitian Keempat adalah penelitian yang dilakukan oleh Ren He dan Jun Cheng Wang. Penelitian ini berjudul *Vertical Vibration Control Of An In-Wheel Motor-Driven Electric Vehicle Using An In-Wheel Active Vibration System*. Pada penelitian ini dilakukan simulasi untuk mengetahui respon dinamis pada struktur wheel setelah diberikan pembebanan dinamis dari eksitasi jalan yang berupa *power spectral density*. Pada simulasi ini digunakan permodelan kendaraan dengan 2 *Degree of Freedom* seperti ditunjukkan ada gambar dibawah ini. Beban dinamis didapatkan dengan permodelan *Matlab Simulink* dimana dengan membuat permodelan dinamis setengah kendaraan menjadi acuan dalam menyusun blok diagram pada matlab. Nilai dari massa kendaraan, massa roda, konstanta pegas suspensi, konstanta damping suspensi, konstanta pegas ban, dan konstanta damping ban perlu untuk ditentukan terlebih dahulu. Gambar 2.16 menunjukkan permodelan setengah kendaraan skuter listrik yang akan menjadi acuan untuk Menyusun blok diagram pada Matlab Simulink.



Gambar 2.16 Permodelan Kendaraan

Dimana,

M_s = Sprung Mass

M_t dan M_m = Unsprung Mass

K_t = Tire Stiffness

K_s = Suspension Stiffness

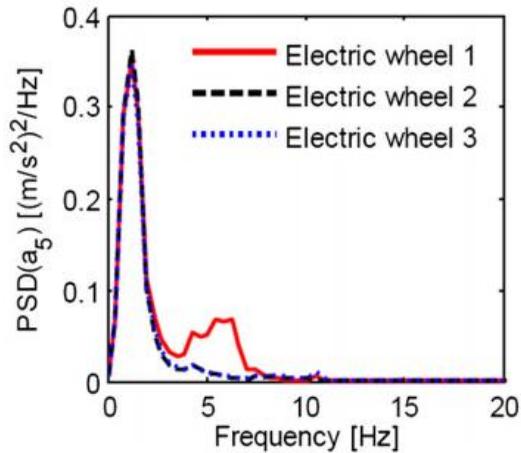
C_s = Koefisien Damping dari Suspensi

X_s = Vertical Displacement dari Sprung Mass

X_u = Vertical Displacement dari Unsprung Mass

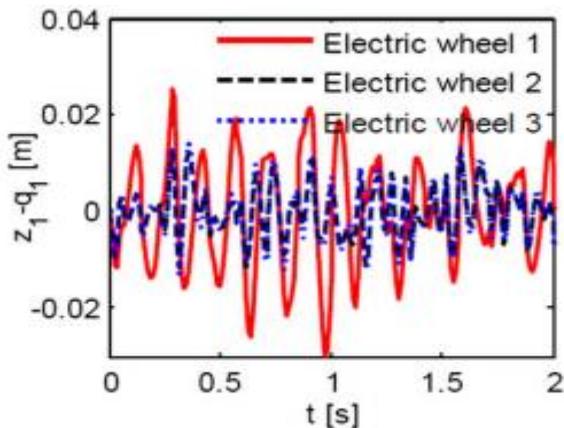
q = Input displacement dari profil jalan

Input *displacement* dari profil jalan pada penelitian ini didapatkan dari *integral white noise random epavement*. Kecepatan kendaraan pada simulasi ini adalah 20 m/s. Profil jalan yang digunakan adalah profil jalan ISO A. Setelah simulasi dilakukan, didapatkan respon power cent density seperti dtunjukkan pada gambar 2.17



Gambar 2.17 *Power Spectral Density Pada Electric Wheel*

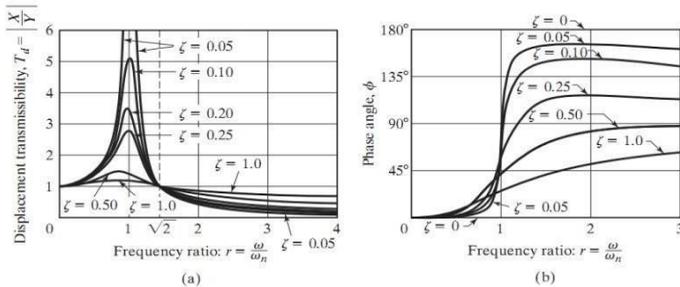
Power spectral density yang didapatkan dari simulasi kemudian diterapkan pada struktur wheel untuk mengetahui respon struktur wheel terhadap pembebanan dinamis yang didapat dari eksitasi jalan. Respon deformasi struktur wheel terhadap pembebanan dinamis ditunjukkan pada gambar 2.18



Gambar 2.18 *Respon Deformasi Struktur Wheel*

2.10 Transmibiitas Perpindahan

Rasio dari amplitudo respon $X_p(t)$ terhadap *base motion* $y(t)$, yaitu x/y disebut dengan perpindahan *Transmissibility* (Rao, 2010). Perpindahan transmissibility adalah seberapa besar respon gerakan yang ditransmisikan dari input jalan ke massa kendaraan dengan variasi frekuensi saat berkendara. Grafik transmisiabilitas perpindahan dapat dilihat pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Grafik Variasi T_d dan ϕ terhadap r

Berikut ini merupakan karakteristik yang didapat dari gambar 2.19 yaitu:

1. $T_d = 1$ saat $r = 0$ dan mendekati 1 untuk nilai r yang sangat kecil
2. Untuk sistem yang tak teredam ($\zeta = 0$), T_d menuju tak hingga saat $r = 1$ (resonansi)
3. Nilai $T_d < 1$ ketika $r = \sqrt{2}$, untuk semua nilai ζ
4. Nilai $T_d = 1$ ketika $r = \sqrt{2}$, untuk semua nilai ζ
5. Untuk $r < \sqrt{2}$, semakin kecil nilai ζ maka akan semakin besar T_d -nya. Sebaliknya, untuk $r > \sqrt{2}$, semakin kecil nilai ζ maka akan semakin kecil T_d -nya
6. Nilai dari T_d mencapai maksimum untuk $0 < \zeta < 1$ pada saat $r = r_m < 1$. Perumusan r_m dapat ditulis sebagai berikut:

2.11 Transmibiitas Gaya

Rasio dari FT/kY diketahui sebagai force transmissibility dengan

catatan gaya yang ditransmisikan berada pada fase yang sama dengan gerakan dari massa $x(t)$. Gambar 2.18 menunjukkan variasi gaya yang ditransmisikan ke permukaan jalan (base) dengan rasio frekuensi (r) dimana nilai untuk damping ratio (ζ) berbeda.

Gaya, F , ditransmisikan ke permukaan jalan atau tumpuan bergantung pada reaksi dari pegas (spring) dan dashpot. Gaya tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F = k(x - y) + c(\dot{x} - \dot{y}) = -m\ddot{x} \quad (2.23)$$

Dari persamaan 2.11 dan persamaan 2.15 didapatkan

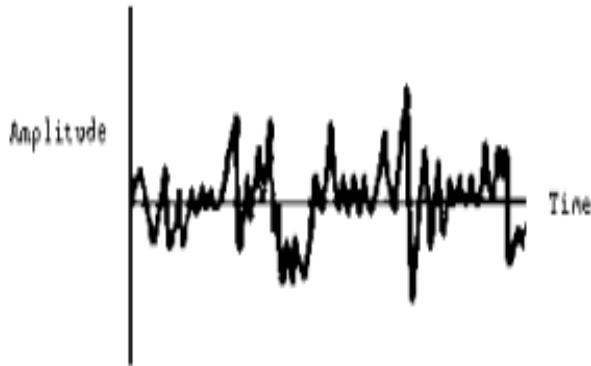
$$F = m\omega^2 X \sin(\omega t - \phi) = F_t \sin(\omega t - \phi) \quad (2.24)$$

Dimana F_t adalah amplitudo atau nilai maksimum dari gaya yang ditransmisikan ke permukaan jalan, dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{F_t}{kY} = r^2 \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2} \quad (2.25)$$

2.12 Random Vibration

Getaran acak adalah gerak yang bersifat non deterministik, artinya perilaku masa depan tidak dapat diprediksi secara tepat. Keacakan adalah karakteristik dari eksitasi atau input, bukan keacakan *mode shape* atau frekuensi natural. Beberapa contoh umum getaran acak termasuk mengendarai mobil di jalan yang kasar, ketinggian gelombang di atas air, atau beban yang ditimbulkan pada sayap pesawat selama penerbangan. Respon struktural terhadap getaran acak biasanya diperlakukan dengan menggunakan pendekatan statistik atau probabilistik. Secara matematis, getaran acak dicirikan sebagai proses ergodik dan stasioner.



Gambar 2.20 Amplitude Time History Pada Getaran Acak

Perbedaan utama antara getaran sinusoidal dan getaran acak yaitu pada getaran acak banyak frekuensi dapat tereksitasi pada saat yang bersamaan. Jadi resonansi struktural dari berbagai komponen dapat dieksitasi secara bersamaan. Pada getaran sinusoidal masing-masing resonansi akan tereksitasi secara terpisah. Gambar 2.20 menunjukkan *amplitude time history* pada getaran acak

Meskipun amplitudo sesaat dari getaran acak tidak dapat diungkapkan secara matematis sebagai fungsi waktu yang tepat, adalah mungkin untuk menentukan probabilitas terjadinya amplitudo tertentu berdasarkan statistik. Untuk mencirikan proses stasioner, Data waktu histori harus diperoleh, dimana amplitudo diukur pada rentang frekuensi eksitasi. Jadi, tiga parameter yang menarik adalah: frekuensi, waktu, dan amplitudo. Informasi ini akan memberikan kemampuan untuk menganalisis proses acak dalam statistik. Karakterisasi getaran acak biasanya menghasilkan spektrum frekuensi *Power Spectral Density* (PSD) atau *Acceleration Spectral Density* (ASD), yang mendefinisikan distribusi power atas rentang frekuensi eksitasi

2.13 Power Spectral Density

Power Spectral Density (PSD) adalah respons frekuensi dari sinyal acak atau periodik. Ini memberi tahu kita di mana daya rata-rata didistribusikan sebagai fungsi frekuensi. PSD bersifat deterministik, dan untuk jenis sinyal acak tertentu tidak bergantung pada waktu. Ini berguna karena transformasi Fourier dari sinyal waktu acak itu sendiri acak, dan oleh karena itu jarang digunakan untuk menghitung hubungan transfer.

PSD dari sinyal waktu acak $x(t)$ dapat diekspresikan dalam salah satu dari dua cara yang setara satu sama lain

1. PSD adalah rata-rata dari besaran transformasi Fourier kuadrat, selama interval waktu yang panjang

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{2T} \left| \int_{-T}^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt \right|^2 \right\} \quad (2.26)$$

2. PSD adalah transformasi Fourier dari fungsi korelasi otomatis.

$$S_x(f) = \int_{-T}^T R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2.27)$$

Power dapat dihitung dari sinyal acak pada pita frekuensi tertentu sebagai berikut:

1. Total Power pada $x(t)$:

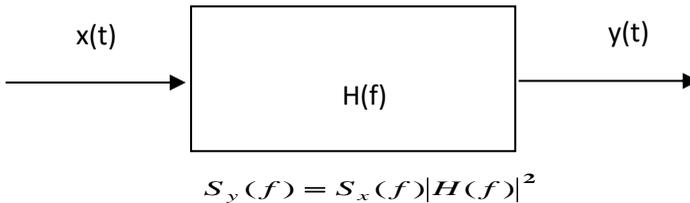
$$P = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) df = R_x(0) \quad (2.28)$$

2. Power in $x(t)$ pada range $f_1 - f_2$:

$$P_{12} = \int_{f_1}^{f_2} S_x(f) df = R_x(\mathbf{0}) \quad (2.29)$$

Sinyal harus stasioner, yang berarti statistik kita tidak berubah sebagai fungsi waktu

Jika sinyal acak $x(t)$ dilewatkan melalui filter invarian waktu dengan respon frekuensi $H(f)$, sinyal yang dihasilkan $y(t)$ memiliki PSD seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.21.



Gambar 2.21 Proses PSD

2.14 *Fatigue*

Fatigue atau kelelahan adalah bentuk dari kegagalan yang terjadi pada struktur karena beban dinamik yang berfluktuasi dibawah yield strength yang terjadi dalam waktu yang lama dan berulang-ulang. *Fatigue* menduduki 90% penyebab utama kegagalan pemakaian. Terdapat 3 fase dalam perpatahan *fatigue* : permulaan retak, penyebaran retak, dan patah. Mekanisme dari permulaan retak umumnya dimulai dari *crack initiation* yang terjadi di permukaan material yang lemah atau daerah dimana terjadi konsentrasi tegangan di permukaan (seperti goresan, notch, lubang-pits dll) akibat adanya pembebanan berulang. Selanjutnya, adalah penyebaran retak ini berkembang menjadi *microcracks*. Perambatan atau perpaduan *microcracks* ini kemudian membentuk

macrocracks yang akan berujung pada failure. Maka setelah itu, material akan mengalami apa yang dinamakan perpatahan.

Perpatahan terjadi ketika material telah mengalami siklus tegangan dan regangan yang menghasilkan kerusakan yang permanen. Suatu bagian dari benda dapat dikenakan berbagai macam kondisi pembebanan termasuk tegangan berfluktuasi, regangan berfluktuasi, temperatur berfluktuasi (fatik termal), atau dalam kondisi lingkungan korosif atau temperatur tinggi. Kebanyakan kegagalan pemakaian terjadi sebagai akibat dari tegangan-tegangan tarik.

Awal proses terjadinya kelelahan (fatigue) adalah jika suatu benda menerima beban yang berulang maka akan terjadi slip. Ketika slip terjadi dan benda berada di permukaan bebas maka sebagai salah satu langkah yang disebabkan oleh perpindahan logam sepanjang bidang slip. Ketika tegangan berbalik, slip yang terjadi dapat menjadi negatif (berlawanan) dari slip awal, secara sempurna dapat mengesampingkan setiap efek deformasi. Deformasi ini ditekankan oleh pembebanan yang berulang, sampai suatu retak yang dapat terlihat akhirnya muncul retak mula-mula terbentuk sepanjang bidang slip.

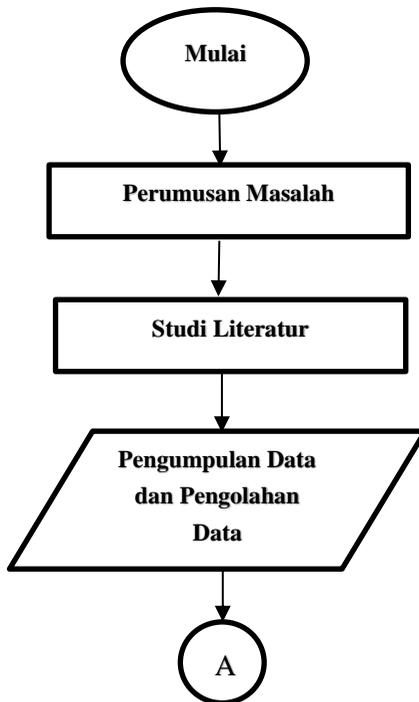
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3

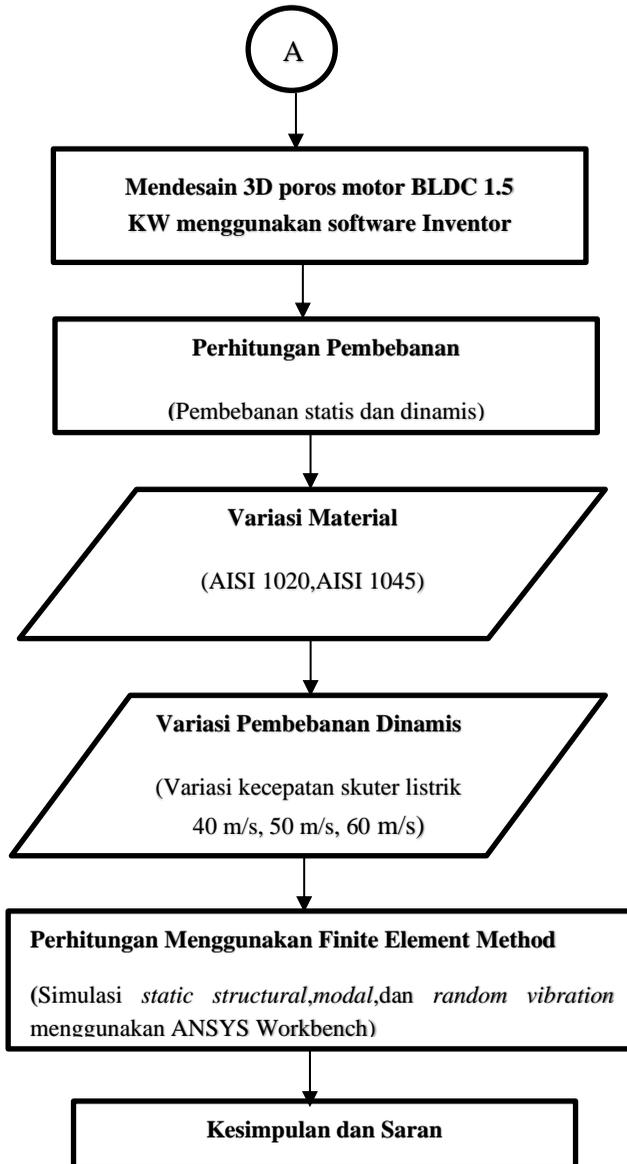
METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini terdapat beberapa tahapan yang dilakukan. Pada bab ini akan dibahas tahapan-tahapan yang dilakukan beserta detailnya dalam melakukan penelitian ini.

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar 3.1 Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir(Lanjutan)

Gambar 3.1 merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan penulis dalam penulisan laporan ini. Penjelasan secara lebih rinci bagian dari flowchart diatas adalah sebagai berikut:

3.1.1 Perumusan Masalah

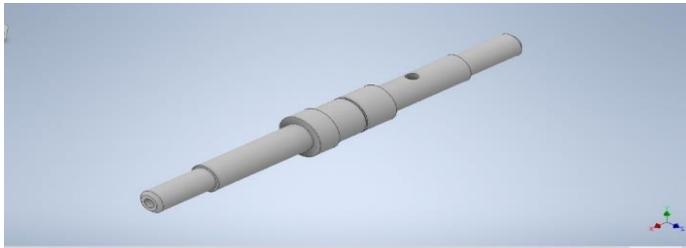
Setelah observasi dilakukan, dilakukan perumusan masalah yang terdapat pada lingkup observasi yang dilakukan. Permasalahan yang akan diteliti yaitu untuk melihat respon statis dan dinamis pada poros untuk motor BLDC 1.5 Kw pada dua jenis material. Lalu akan dipilih material yang memiliki kualitas yang paling baik untuk diaplikasikan pada poros motor BLDC 1.5 Kw.

3.1.2 Studi Literatur

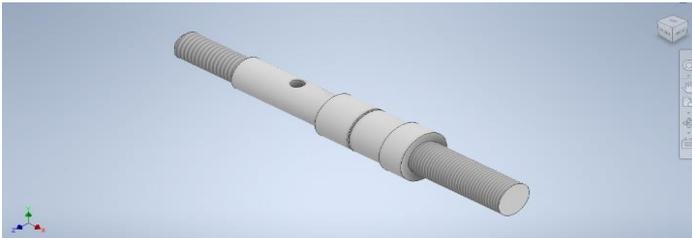
Studi literatur bertujuan untuk mendapatkan informasi yang lebih detail untuk menunjang penelitian yang akan dilakukan. Informasi yang dicari berupa dasar teori poros, kekuatan struktur, *random vibration*, *power spectral density*, metode elemen hingga dan penelitian terdahulu yang telah dirangkum.

3.1.3 Permodelan 3D Poros Motor BLDC 1.5 KW

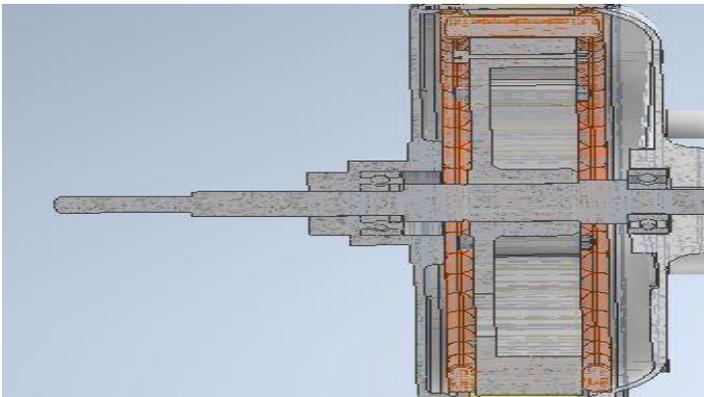
Perancangan ulang model 3D poros untuk motor *BLDC 1.5Kw* dilakukan dengan menggunakan program *Inventor 2020*. Gambar 3.2 menunjukkan perancangan ulang model poros dari tipe *multiple shaft* menjadi *single shaft*. Tipe poros yang dirancang ulang pada simulasi ini adalah tipe *single shaft*. Kelebihan dari poros tipe *single shaft* yaitu mempunyai desain yang lebih simple, biaya maintenance yang lebih murah, serta biaya pembuatan yang lebih murah. Selain itu, poros *single shaft* cocok digunakan pada kendaraan roda dua pada rentang kecepatan yang rendah.



(a)



(b)

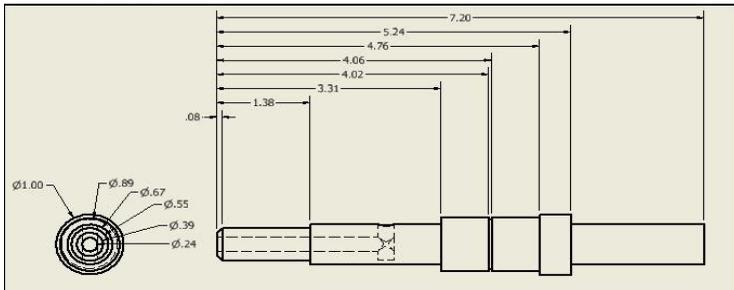


(c)

Gambar 3.2 Komponen Poros (a) *Design awal* (b) *Re-Design* (c) *Half Section View*

Jenis poros yang digunakan pada In Wheel Motor adalah *hollow shaft*. Kelebihan dari poros dengan jenis *hollow shaft* yaitu

memiliki berat yang lebih ringan serta memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibanding solid shaft dengan berat yang sama. Spesifikasi dimensi dari rancangan ulang poros untuk motor BLDC 1.5 Kw ditunjukkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Dimensi Poros

3.1.4 *Material*

Material yang digunakan penelitian ini adalah *carbon steel* AISI 1020 dan *carbon steel* AISI 1045. Gambar 3.4 menunjukkan *material properties* pada AISI 1045 sedangkan gambar 3.5 menunjukkan *material properties* untuk AISI 1020.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7.87	g cm ⁻³	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.12E-05	C ⁻¹	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Derive from	Young...			
7	Young's Modulus	2.12E+05	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Poisson's Ratio	0.29		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Bulk Modulus	1.6825E+11	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Shear Modulus	8.2171E+10	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Tensile Yield Strength	450	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Tensile Ultimate Strength	585	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Gambar 3.4 Material Properties Baja Karbon AISI 1045

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7.87	g cm ⁻³	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	
5	Coefficient of Thermal Expansion	6.51	F ⁻¹	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
7	Derive from	Young...			
8	Young's Modulus	2E+05	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0.29			<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1.5873E+11	Pa		<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	7.7519E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
12	Tensile Yield Strength	345	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Tensile Ultimate Strength	440	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Gambar 3.5 Material Properties AISI 1020

Dalam analisa statis dan dinamis ini digunakan material berupa baja karbon. Baja karbon merupakan salah satu jenis baja paduan yang terdiri atas unsur besi (Fe) dan karbon (C). Dimana besi merupakan unsur dasar dan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Dalam proses pembuatan baja akan ditemukan pula penambahan kandungan unsur kimia lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), mangan (Mn) dan unsur kimia lainnya sesuai dengan sifat baja yang diinginkan. Baja karbon memiliki kandungan unsur karbon dalam besi sebesar 0,2% hingga 2,14%, dimana kandungan karbon tersebut berfungsi sebagai unsur penguat dalam struktur baja.

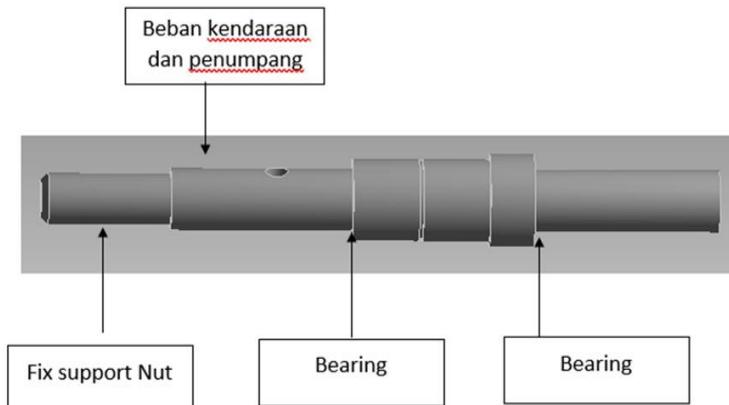
3.1.5 Permodelan Pembebanan Statis

Beban statis akibat dari berat kendaraan, berat pengendara dan berat

penumpang. Berikut merupakan rincian pembebanan.

1. Berat kendaraan : 70 kg
2. Berat pengendara : 70 kg
3. Berta penumpang : 70 kg

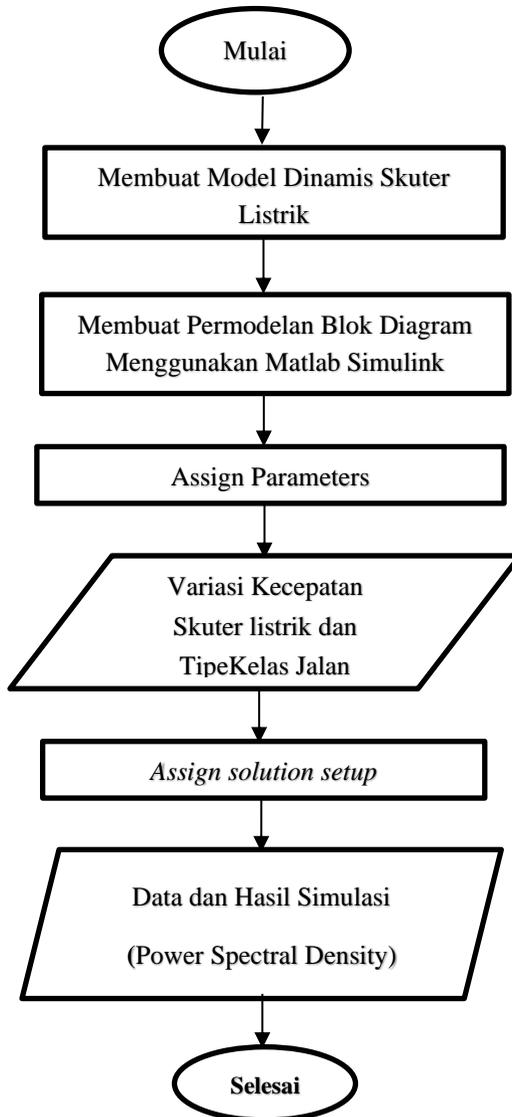
Berat dari motor E-Scooter sendiri pada penelitian tugas akhir kali ini diabaikan dikarenakan efek yang ditimbulkan terhadap poros sangat kecil. Untuk *free body diagram (FBD)* pada pembebanan statis dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Free Body Diagram Pembebanan Statis

3.1.6 Permodelan Pembebanan Dinamis Menggunakan Simulink Matlab

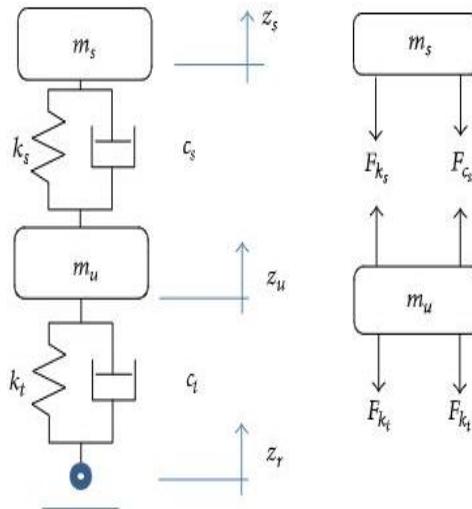
Skenario untuk permodelan pembebanan dinamis pada penelitian ini adalah skuter listrik yang melintasi suatu profil jalan dengan variasi kecepatan 40 Km/jam, 50 Km/jam, dan 60 km/jam. Penjelasan lebih lanjut mengenai tahapan ini akan dijelaskan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Flowchart Permodelan Beban Dinamis Dengan Matlab

3.1.6.1 Model Dinamis Skuter Listrik

Berikut disusun model sebagian skuter listrik yang akan digunakan sebagai permodelan blok diagram pada Matlab Simulink seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Model Dinamis Skuter Listrik

Dimana

M_s = Sprung mass

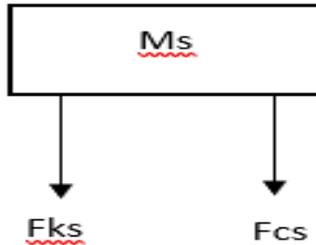
M_u = Unsprung mass

K_s = Konstanta pegas bodi skuter

C_s = Konstanta damping bodi skuter

K_t = Konstanta pegas wheel

C_t =Konstanta damping wheel



Gambar 3.9 Free Body Diagram Pada Sprung Mass

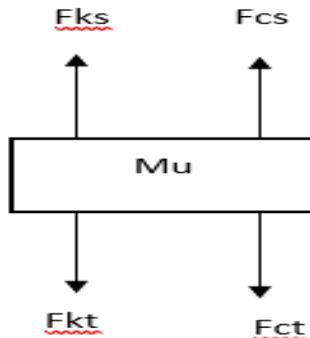
Gambar 3.9 menunjukkan *free body diagram* pada *sprung mass* dengan *equation of motion* pada *sprung mass* adalah sebagai berikut :

$$Ms\ddot{Z}_1 + F_{ks} + F_{cs} = 0$$

$$Ms\ddot{Z}_1 + K_s (Z_1 - Z_2) + C_s (\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) = 0$$

$$Ms\ddot{Z}_1 + C_s \dot{Z}_1 - C_s \dot{Z}_2 + K_s Z_1 - K_s Z_2 = 0$$

$$\ddot{Z}_1 = \frac{1}{Ms} (-C_s \dot{Z}_1 + C_s \dot{Z}_2 - K_s Z_1 + K_s Z_2)$$



Gambar 3.10 Free Body Diagram Unsprung Mass

Gambar 3.10 menunjukkan *free body diagram* pada *unsprung mass* dengan *equation of motion* sebagai berikut:

$$Mu\ddot{Z}_2 + F_{kt} + F_{ct} - F_{ks} - F_{cs} = 0$$

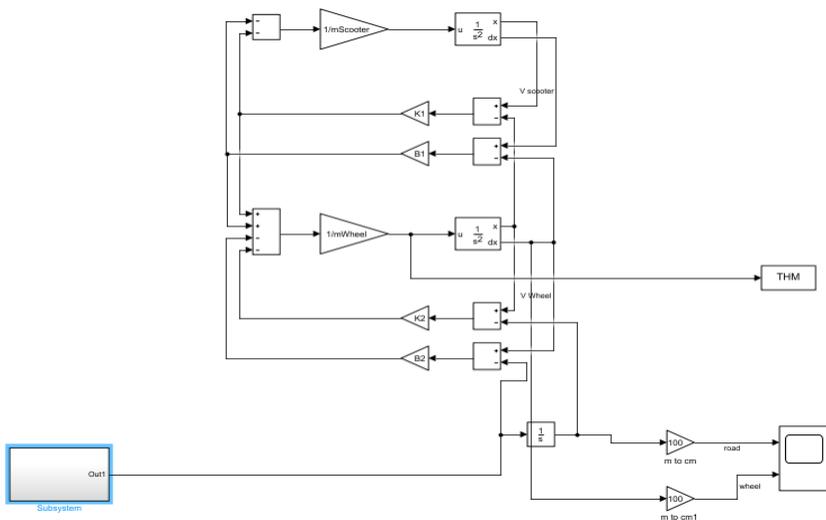
$$Mu\ddot{Z}_2 + K_t(Z_2 - Z_0) + C_t(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_0) - K_s(Z_1 - Z_2) - C_s(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) = 0$$

$$Mu\ddot{Z}_2 + K_t Z_2 - K_t Z_0 + C_t \dot{Z}_2 - C_t \dot{Z}_0 - C_s \dot{Z}_1 + C_s \dot{Z}_2 - K_s Z_1 + K_s Z_2 = 0$$

$$\ddot{Z}_2 = \frac{1}{Mu} ((C_t - C_s) \dot{Z}_2 + C_s \dot{Z}_1 - C_t \dot{Z}_0 - (K_t + K_s) Z_2 + K_s Z_1 + K_s Z_0)$$

3.16.2 Pembuatan Blok Diagram Pada Matlab Simulink

Setelah Menyusun model dinamis serta mendapatkan persamaan gerak pada sistem, selanjutnya dibuat blok diagram pada software Matlab Simulink seperti pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Blok Diagram

3.1.6.3 Assign Parameters

Parameter pertama yang ditentukan adalah nilai dari massa kendaraan, massa dari *wheel*, konstanta pegas bodi skuter listrik, konstanta pegas *wheel*, konstanta damping bodi skuter, konstanta damping *wheel*

Lalu setelah itu ditentukan parameter profil jalan yang digunakan, yaitu profil jalan C serta variasi kecepatan skuter listrik yaitu pada 40 km/jam, 50 km/jam, dan 60 km/jam. Parameter profil jalan serta variasi kecepatan skuter listrik diinput pada persamaan *spectral density* dimana:

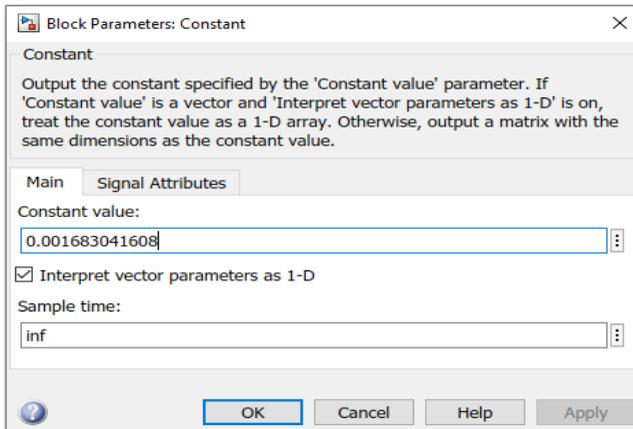
$$\sqrt{k} = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)v}$$

Dimana $G_q(n_0)$ merupakan *average road class* serta v merupakan kecepatan skuter listrik. Nilai dari *average road class* pada tipe kelas jalan yang berbeda dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Road Class

Road class	$G_d(n_0)(10^{-6}) \text{ m}^3$		$G_d(\Omega_0)(10^{-6}) \text{ m}^3$		ISO description
	Lower limit	Upper limit	Lower limit	Upper limit	
A	-	32	-	2	very good
B	32	128	2	8	good
C	128	512	8	32	average
D	512	2048	32	128	poor
E	2048	8192	128	512	very poor
F	8192	32768	512	2048	-
G	32768	131072	2048	8192	-
H	131072	-	8192	-	-
$n_0 = 0.1 \text{ cycles/m}$			$\Omega_0 = 1 \text{ rad/m}$		

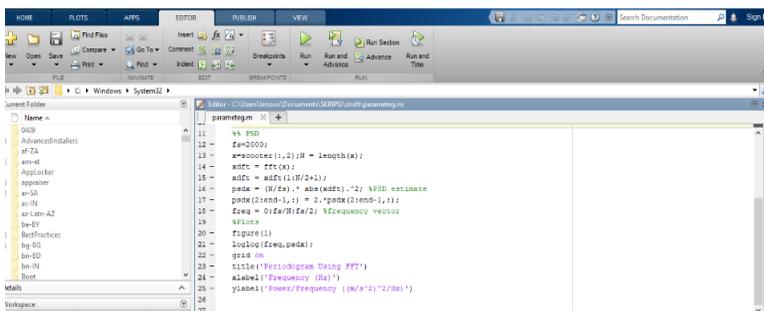
Setelah perhitungan *spectral density* dengan parameter profil jalan serta kecepatan skuter, dilakukan input konstanta ke Matlab Simulink seperti pada gambar 3.12 dibawah ini.



Gambar 3.12 Block Parameters

3.1.6.4 Assign Solution

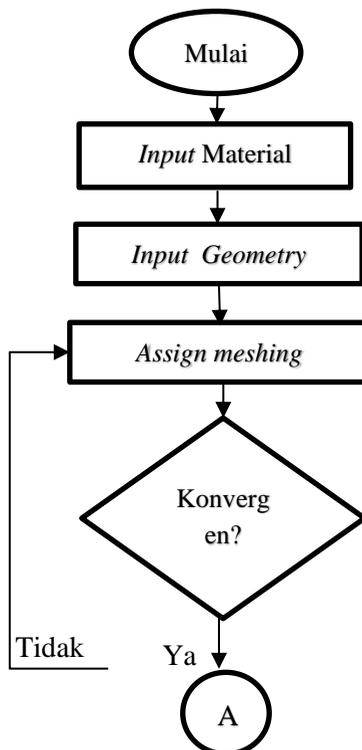
Setelah pembuatan blok diagram serta parameter telah ditentukan, maka Langkah selanjutnya adalah mendapatkan nilai dari *power spectral density* yang dicari. Code Matlab yang digunakan untuk perhitungan *power spectral density* ditunjukkan pada gambar 3.13. Langkah yang dilakukan pada bagian assign solution adalah dengan men-klik tombol run pada bagian editor.



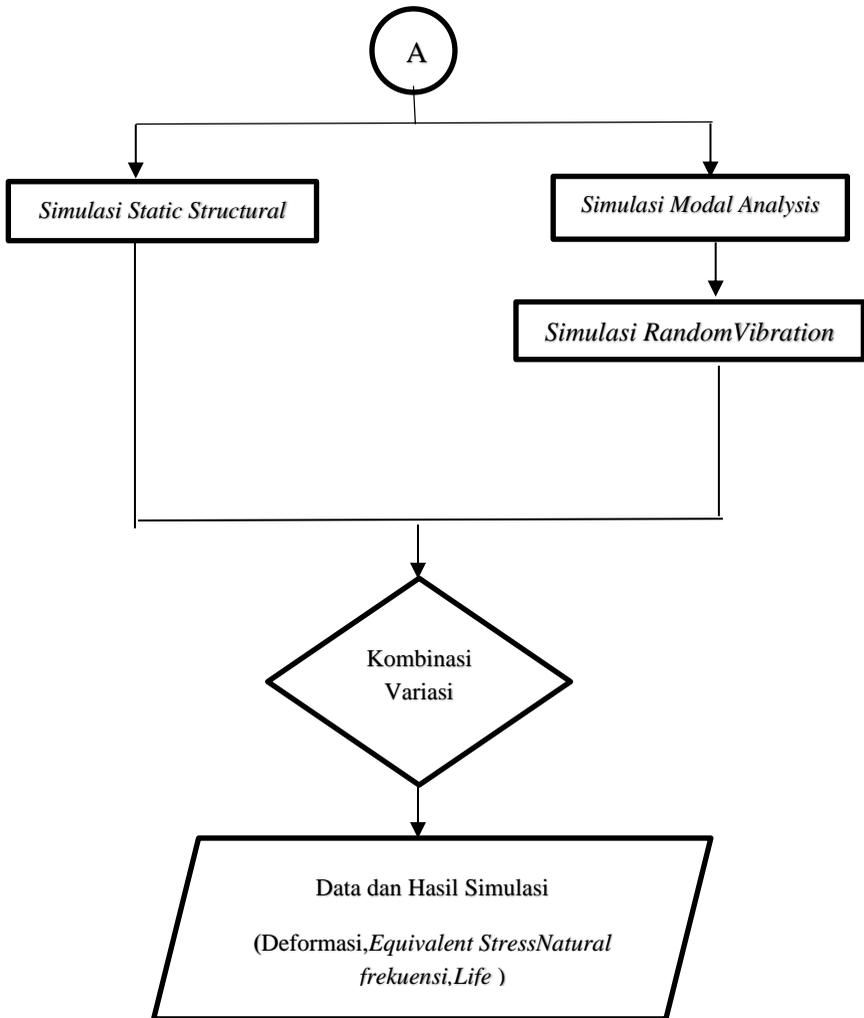
Gambar 3.13 Assign Solutions

3.1.7 Pemodelan 3D Poros Motor BLDC 1.5 KW

Setelah desain 3D *poros* selesai, dilakukan simulasi 3D FEM pada *software ANSYS* dengan metode *static structural, modal, dan random vibration*. Dari simulasi ini akan didapatkan hasil berupa deformasi serta *equivalent stress* pada poros dari beberapa material setelah mendapat pembebanan statis dan dinamis. Penjelasan lebih lanjut mengenai tahapan pada simulasi FEM akan dijelaskan sebagai berikut



Gambar 3.14 *Flowchart Permodelan Finite Element Method*



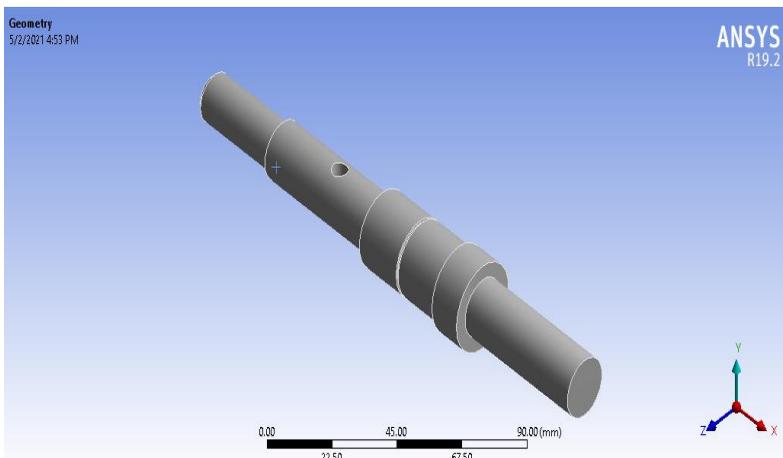
Gambar 3.14 *Flowchart Permodelan Finite Element Method(Lanjutan)*

Gambar 3.14 merupakan diagram alir yang menjelaskan tahapan-tahapan simulasi penelitian ini. Simulasi menggunakan *software*

ANSYS Maxwell v19. Penjelasan tentang tiap tahapan adalah sebagai berikut:

3.1.7.1 Input Model 3 Dimensi

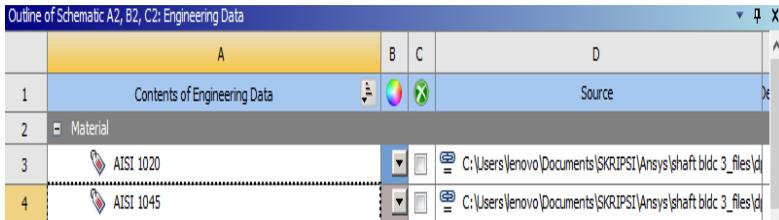
Untuk melakukan *input* model 3 dimensi, hal yang pertama dilakukan adalah membuka *software* ANSYS Workbench kemudian pilih *project*. Lalu setelah itu terdapat pilihan *import geometry* dimana dilakukan input geometri yang telah di desain menggunakan *software* Inventor seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.15.



Gambar 3.15 *Input 3D Model*

3.1.7.2 Assign Material

Setelah memasukkan model ke dalam *project*, dilakukan *assign material* yang berfungsi memberikan material pada model. Material yang akan digunakan tidak terdapat pada *library* ANSYS Workbench v19, maka properties dari setiap material diinput satu per satu ke dalam Ansys Workbench v19 seperti pada gambar 3.16



Gambar 3.16 Material Properties

3.1.7.3 Assign Meshing Operation

Selanjutnya, pengaturan *mesh* pada setiap model 3 dimensi. Bentuk *meshing* volume yang digunakan dalam *software* ini adalah tipe tetrahedral. Proses *meshing* digunakan untuk membagi model desain *frame* menjadi model diskrit yang mana merupakan proses dari *finite element method* (FEM). Semakin banyak elemen *meshing*, maka semakin baik dan hasilnya akan mendekati nilai yang sesungguhnya. Semakin banyak elemen yang terbagi dalam suatu geometri, akan semakin membutuhkan waktu yang lama dalam proses simulasi. Oleh karena itu, dibutuhkan uji konvergensi agar didapatkan hasil yang menggambarkan kondisi yang sesungguhnya dengan jumlah elemen yang tepat. Tabel 3.2 dibawah ini menunjukkan hasil uji konvergensi yang telah dilakukan.

Tabel 3.2 Hasil Uji Konvergensi

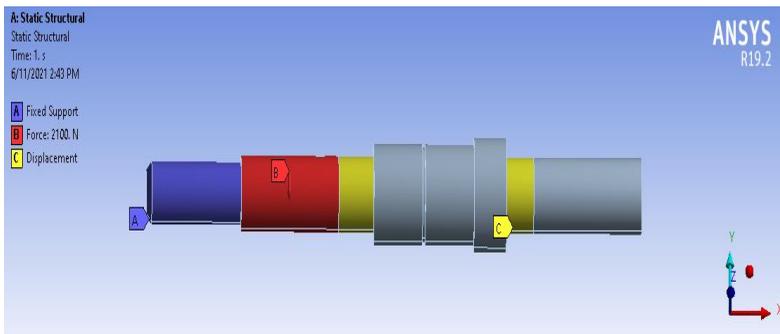
Meshing Size (mm)	Orthogonal Quality	Max Equivalent Stress (Mpa)	error (%)
3mm	0.7633	33.132	1.46
4 mm	0.7332	32.656	3.8
5 mm	0.71888	31.385	4.5
6 mm	0.72435	29.952	5.6
7mm	0.7169	28.253	4.7

Pada uji konvergensi ini ini diambil *meshing* dengan ukuran elemen 3 mm karena ukuran tersebut merupakan ukuran *error* perbedaan *stress* yang paling kecil serta sudah berada di bawah 5%.

Selain itu *meshing* dengan ukuran 3 mm ini juga mempunyai *orthogonal quality* yang paling besar yaitu sebesar 0,73137 yang masih berada di kategori *very good*. Oleh karena itu, maka diambilah *meshing* ukuran 3 mm ini untuk simulasi menggunakan *software ANSYS Workbench* kedepannya karena dirasa sudah konvergen.

3.1.7.4 Simulasi *Static Structural*

Setelah dilakukan uji konvergensi dan didapatkan hasil *meshing* yang sudah baik dan konvergen, selanjutnya akan dilakukan simulasi *static structural* terhadap desain *poros* dengan menggunakan *software ANSYS Workbench*. Dalam simulasi desain *poros* akan dikenai pembebanan yang akan diatur sesuai dengan spesifikasi maksimum beban yang akan ditumpu oleh kendaraan. Pembebanan tersebut terdiri dari beban maksimal pengendara sebesar 140 Kg serta berat kendaraan sebesar 70 kg. Gambar 3.17 menunjukkan ilustrasi penempatan pembebanan yang akan diaplikasikan ke desain *frame* dalam simulasi *static structural* ini



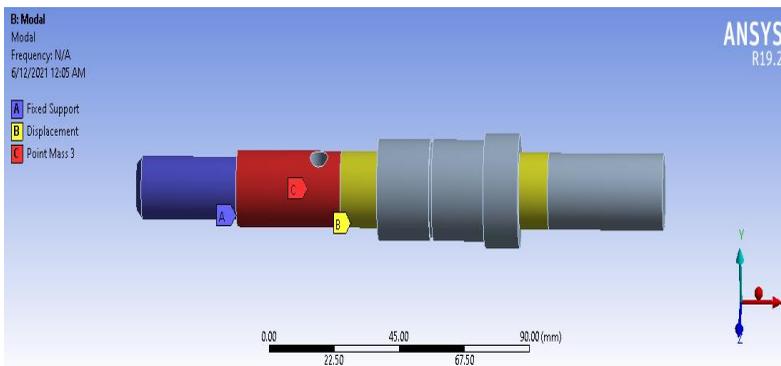
Gambar 3.17 *Boundaries Setup* Simulasi *Static Structural*

Pembebanan pada simulai ini diletakkan pada bagian poros yang digenggam oleh swing arm skuter. Pembebanan dilambangkan dengan huruf B. *Fixed support* yang dilambangkan dengan huruf A diletakkan pada bagian ujung poros yang terkunci dari *swing arm*.

Support yang terdapat dari bearing dilambangkan dengan huruf C yang merupakan *support* ke sumbu x dan y. Setelah dilakukan simulasi *static structural*, akan didapatkan total deformasi serta distribusi tegangan setelah dikenai pembebanan statis maksimal saat kendaraan beroperasi.

3.1.7.5. Simulasi Modal

Dalam analisa modal ini, model 3D dari poros *E-Scooter* ini akan dicari karakteristik dinamikanya dengan bantuan *software ANSYS Workbench*. Hasil dari analisa modal ini akan didapatkan frekuensi natural beserta mode getar. Jumlah mode getar yang dicari dalam analisa modal ini bisa ditentukan. Pencarian 6 mode getar pada analisa modal ini sudah cukup untuk merepresentasikan keadaan pada saat operasi. Hal ini dikarenakan frekuensi operasi dari skuter listrik dirasa akan berada cukup jauh dibawah frekuensi natural hasil dari analisa modal ini. Gambar 3.18 adalah *setting* yang diterapkan di *software ANSYS Workbench* saat dilakukan analisa modal



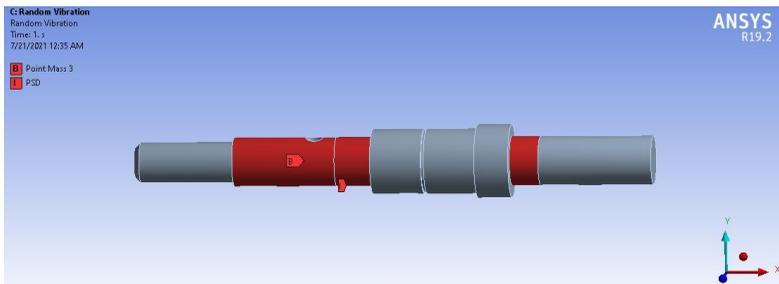
Gambar 3.18 Analysis Setting Analisa Modal

Selanjutnya mode getar yang didapat akan diidentifikasi bagaimana jenis mode getar yang dihaluskan. Lalu, setelah didapatkan hasil frekuensi natural, kemudian dibandingkan dengan frekuensi maksimal operasi kendaraan yang bisa dilihat

dari hasil konversi RPM maksimal motor ketika beroperasi ke frekuensi. Hal tersebut dimaksudkan untuk mencegah terjadinya resonansi, yaitu Ketika frekuensi operasi skuter menyamai frekuensi mode getar yang dapat menyebabkan kerusakan pada sistem.

3.1.7.6 Simulasi *Random Vibration*

Tujuan dari simulasi random vibration adalah untuk menentukan respon dinamis pada struktur setelah mendapatkan suatu *vibration loads* yang random secara alami. Salah satu contoh dari *random vibration* adalah getaran yang timbul akibat dari suatu eksitasi jalan. Konten frekuensi dari suatu *data time history* atau yang biasa disebut dengan spektrum dapat ditangkap secara statistik dan digunakan sebagai pembebanan pada analisa random vibration. Konten frekuensi yang ditangkap sebagai *load* ini disebut sebagai *power central density*. Data Power central density yang akan diinput pada simulasi ini adalah data PSD yang didapatkan dari simulasi pembebanan dinamis menggunakan Matlab Simulink.



Gambar 3.19 *Boundaries Set Up Simulasi Random Vibration*

Gambar 3.19 menunjukkan *boundaries set up* pada simulasi random vibration. *Power spectral density* diterapkan pada kedua bearing sedangkan point mass merepresentasikan beban kendaraan dan dua orang penumpang yang terdapat pada bagian poros yang digenggam oleh swing arm. Terdapat respon *power spectral*

density yang berbeda dari tiga variasi kecepatan skuter dan kelas jalan Variasi kecepatan skuter yang digunakan adalah 40km/jam, 50km/jam, dan 60km/jam. Variasi kelas jalan yang digunakan adalah kelas jalan C, D, dan E. Hasil dari simulasi *random vibration* yang akan di analisa lebih lanjut adalah deformasi,*equivalent stress*,serta *life* dari poros pada motor *Brushless Direct Current Electric Motor* 1,5 Kw setelah diberi *PSD acceleration* ke arah vertical

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

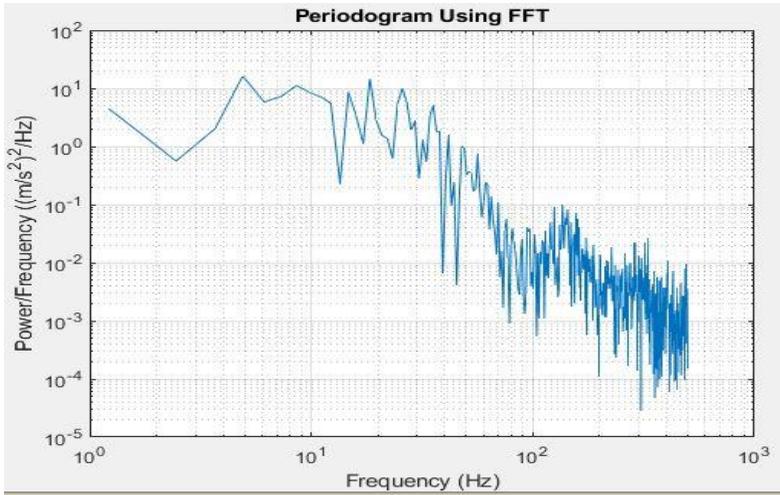
BAB 4

PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

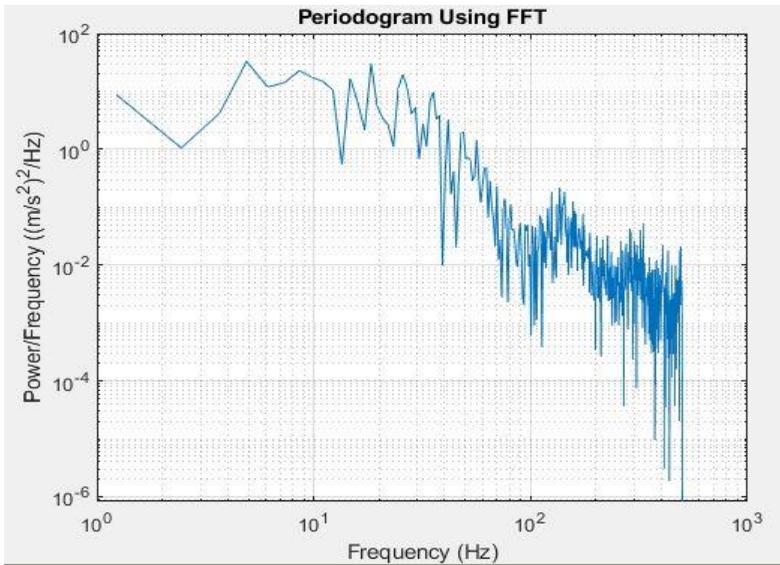
Dalam bab iv ini akan dijelaskan bagaimana *power spectral density* yang didapatkan pada variasi kecepatan skuter listrik, bagaimana *power spectral density* pada tipe kelas jalan yang berbeda, bagaimana deformasi dan *equivalent stress* pada poros setelah mendapatkan pembebanan statis pada material AISI 1020 dan AISI 1045, bagaimana natural frekuensi pada sistem, bagaimana deformasi dan *equivalent stress* pada poros setelah mendapatkan pembebanan dinamis pada kecepatan skuter, material, serta tipe jalan yang berbeda, serta bagaimana life dari poros ketika mendapatkan pembebanan dinamis siklik pada kecepatan yang berbeda.

4.1 *Power Spectral Density* Pada Kecepatan Skuter Listrik 40 Km/jam, 50 Km/jam, dan 60 Km/jam

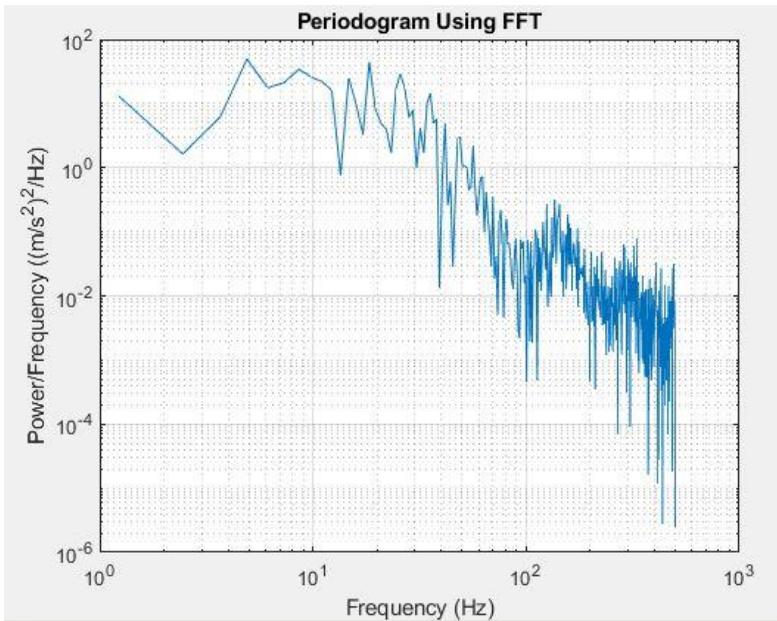
Kecepatan skuter listrik merupakan salah satu variabel yang menentukan besarnya *spectral density*. Semakin tinggi kecepatan dari skuter listrik, maka *spectral density* yang dihasilkan akan semakin besar. Nilai *spectral density* yang semakin besar akan mempengaruhi *displacement* yang dihasilkan dari eksitasi jalan. Semakin besarnya *displacement* yang ditimbulkan oleh suatu eksitasi jalan maka nilai *power spectral density* yang dihasilkan akan menjadi semakin tinggi. Berikut merupakan *power spectral density* pada kecepatan skuter listrik 40 km/jam, 50km/jam, dan 60 km/jam pada profil jalan C yang didapatkan dengan menggunakan *software* Matlab Simulink seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1, gambar 4.2, dan gambar 4.3.



Gambar 4.1 *Power Spectral Density* Pada Kecepatan 20 Km/jam

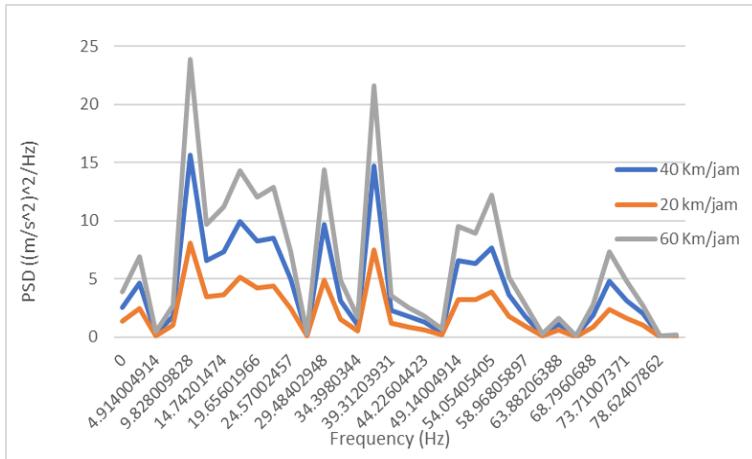


Gambar 4.2 *Power Spectral Density* Pada Kecepatan 40 Km/jam



Gambar 4.3 Power Spectral Density Pada Kecepatan 60 Km/jam

Bedasarkan ketiga grafik diatas, *power spectral density* dengan nilai terbesar berada pada rentang frekuensi 1-10 Hz. Dimana *power spectral density* terbesar untuk kecepatan skuter listrik 20 km/jam adalah $16.26 (m/s^2)^2/Hz$. *Power spectral density* tertinggi untuk kecepatan skuter listrik 40 km/ jam adalah $32.9 (m/s^2)^2/Hz$. *Power spectral density* terbesar untuk kecepatan skuter listrik 60 km/jam adalah $49.37 (m/s^2)^2/Hz$. Perbandingan pola grafik PSD pada kecepatan 40 km/jam, 50 km/jam, dan 60 Km/jam dapat dilihat pada gambar 4.4.



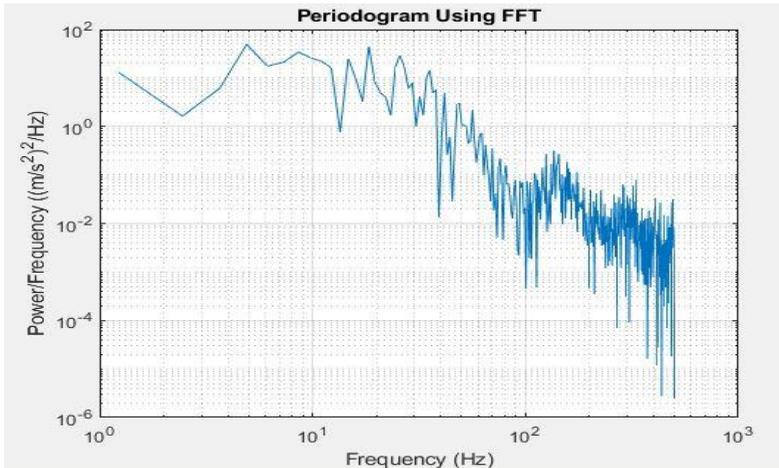
Gambar 4.4 Grafik PSD Pada Variasi Kecepatan

Dari grafik pada gambar 4.4 diatas dapat disimpulkan bahwa hasil PSD yang didapat dari simulasi menggunakan matlab Simulink telah sesuai dimana semakin tinggi kecepatan kendaraan maka semakin besar nilai PSD yang didapatkan dari eksitasi jalan.

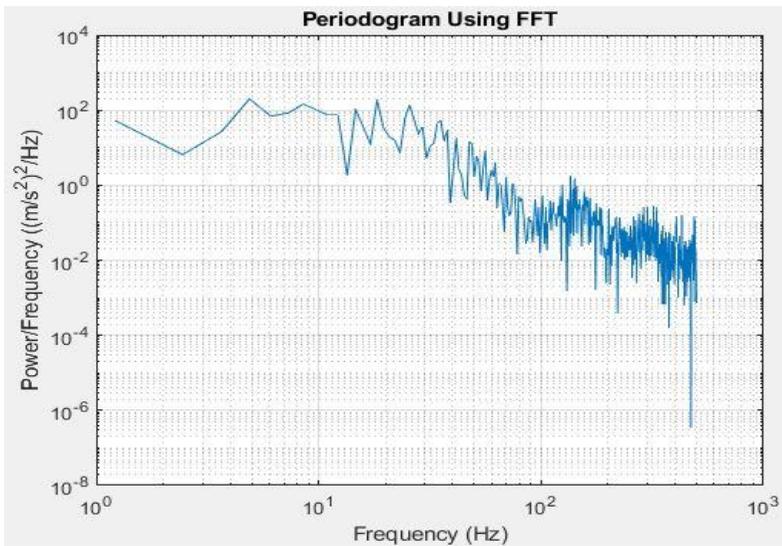
4.2 Power Spectral Density Pada Kelas Jalan C,D,dan E

Hasil simulasi menggunakan matlab Simulink yaitu *power spectral density* pada kelas jalan C, D, dan E seperti ditunjukkan pada gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 dibawah ini. Tipe kelas jalan merupakan salah satu variabel yang mempengaruhi besarnya nilai *spectral density*. Variasi kelas jalan yang digunakan untuk simulasi ini adalah kelas jalan C yang merupakan kelas jalan dengan kualitas *average*, kelas jalan D yang merupakan kelas jalan dengan kualitas *poor*, dan kelas jalan E yang merupakan kelas jalan dengan kualitas *very poor*. Nilai dari *road irregularities* ditunjukkan pada tabel 3.1 *road class* dimana nilai yang diambil untuk kelas jalan C, D, dan E adalah 256,

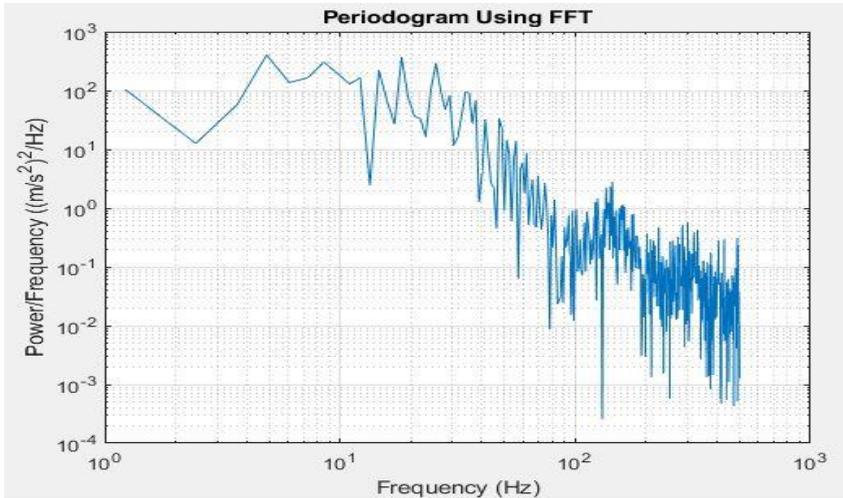
512, dan 1024. Simulasi dilakukan pada kecepatan skuter listrik 60 Km/jam.



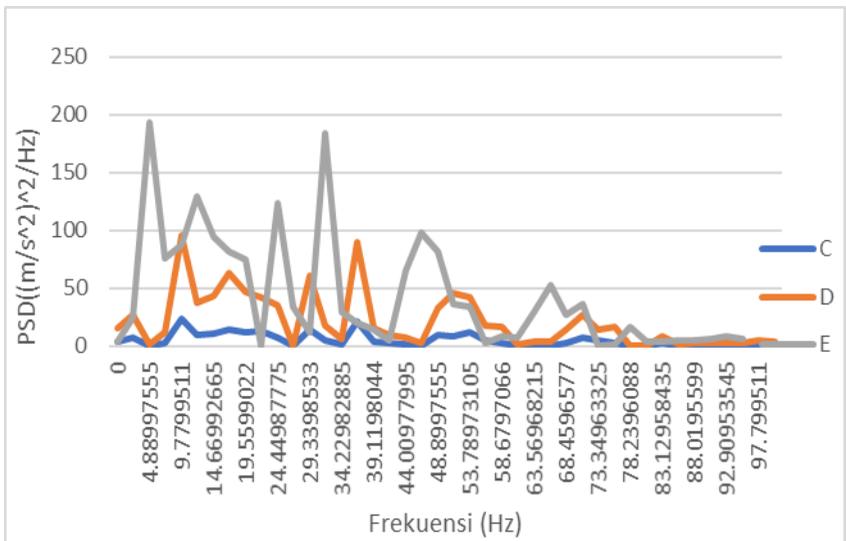
Gambar 4.5 Grafik PSD Kelas Jalan C



Gambar 4.6 Grafik PSD Kelas Jalan D



Gambar 4.7 Grafik PSD Kelas Jalan E



Gambar 4.8 Grafik PSD Pada Variasi Kelas Jalan

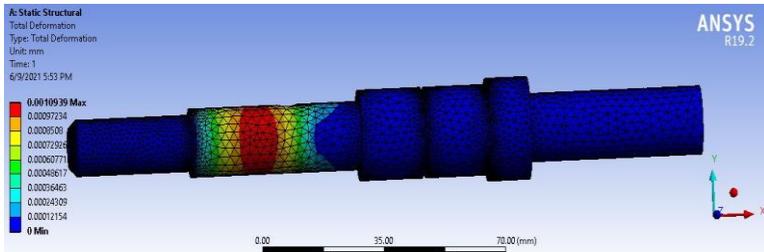
Hasil *power spectral density* tertinggi yang didapatkan pada kecepatan 60 km/jam untuk kelas C, kelas D, dan kelas E adalah $49.37(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$, $198(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$, dan $402 (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$. Hasil *power spectral density* pada ketiga kelas jalan tersebut berada pada rentang frekuensi 1-10 Hz. Perbandingan hasil simulasi yang ditunjukkan pada gambar 4.8 menunjukkan bahwa kualitas jalan berpengaruh secara signifikan terhadap *power spectral density* yang dihasilkan dari suatu jalan. Tipe jalan dengan kualitas yang lebih buruk memiliki *displacement* dari eksitasi jalan yang lebih besar sehingga *power spectral density* yang didapatkan dari eksitasi jalan memiliki nilai yang lebih besar.

4.3 Respon Poros Terhadap Pembebanan Statis Pada Material AISI 1020 dan AISI 1045

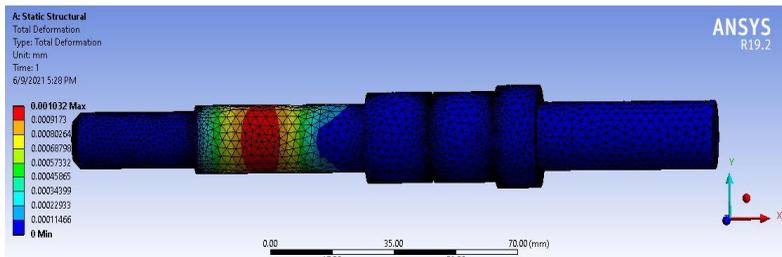
Pada penelitian ini respon poros yang dilihat terhadap pembebanan statis adalah total deformasi dan *equivalent stress* pada material AISI 1020 dan AISI 1045. Pembebanan statis yang berlaku untuk poros adalah pembebanan dari berat kendaraan dan dua orang penumpang. Hasil simulasi menunjukkan poros dengan material AISI 1045 memiliki deformasi yang lebih rendah dibanding poros dengan material AISI 1020. Gambar 4.10 menunjukkan hasil deformasi pada material AISI 1045 yaitu 0.001032 mm sedangkan gambar 4.9 menunjukkan hasil deformasi pada material AISI 1020 yaitu 0.0010932 mm. Hal ini dikarenakan material AISI 1045 memiliki modulus young yang lebih tinggi dibanding material AISI 1020 sehingga poros dengan material AISI 1045 memiliki deformasi yang lebih kecil.

Hasil simulasi untuk *equivalent stress* pada material AISI 1020 dan AISI 1045 menunjukkan hasil yang sama seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.11. *Equivalent stress* pada poros setelah mendapatkan pembebanan statis adalah sebesar 33,132 Mpa. Hal

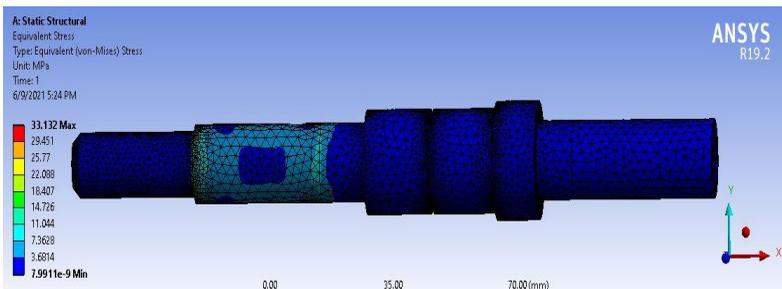
ini karena poros baik pada material AISI 1020 maupun AISI 1045 mendapatkan pembebanan statis yang besarnya sama pada luas area yang sama. *Local Stress* yang mungkin terjadi karena adanya perbedaan material nilainya sangat kecil sehingga dapat diabaikan.



Gambar 4.9 Deformasi Poros AISI 1020 Static Structural



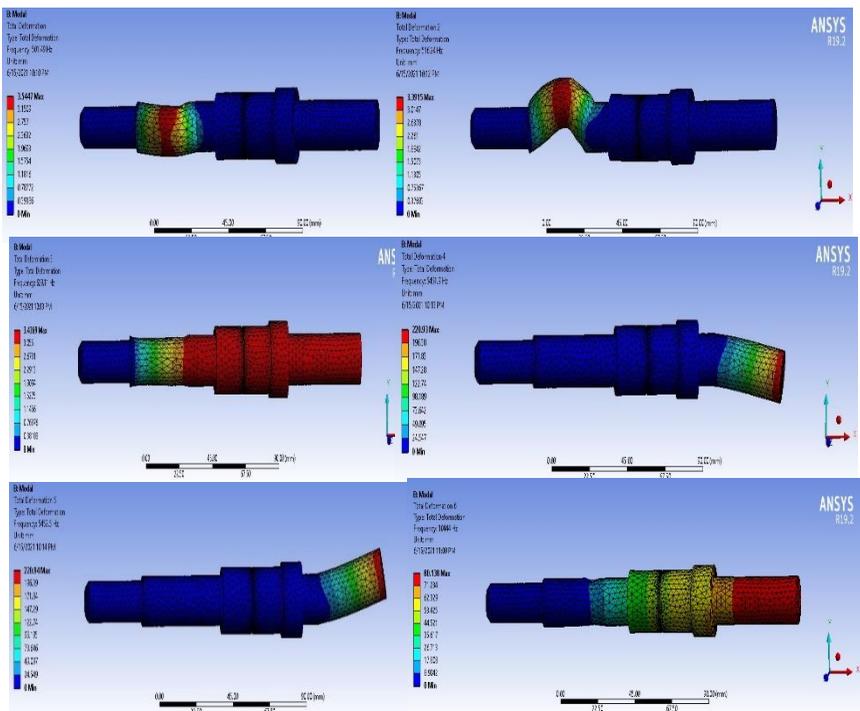
Gambar 4.10 Deformasi Poros AISI 1045 Static Structural



Gambar 4.11 Equivalent Stress Poros Static Structural

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa poros aman ketika mendapatkan pembebanan statis. Hal ini dapat dilihat dari deformasi yang sangat kecil serta *equivalent stress* yang masih dibawah *yield strength* material, baik pada material AISI 1045 maupun AISI 1020.

4.4 Hasil Simulasi Analisa Modal



Gambar 4.12 Deformasi Pada Frekuensi Natural

Gambar 4.12 menunjukkan hasil simulasi modal pada software ANSYS Workbench. Dari simulasi moda didapatkan nilai frekuensi natural dari enam *mode shape* pada poros. Frekuensi natural

penting untuk diketahui agar dapat menghindari terjadinya fenomena resonansi dimana nilai dari frekuensi natural sama dengan nilai frekuensi eksitasi sehingga dapat menyebabkan kerusakan struktur.

	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1	1.	501.49
2	2.	516.24
3	3.	629.11
4	4.	5451.9
5	5.	5452.5
6	6.	10444

Gambar 4.13 Mode Shape dan Frekuensi Natural

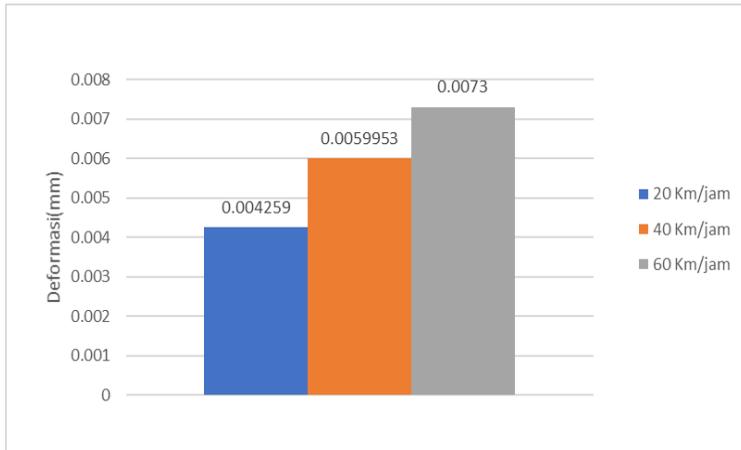
Hasil dari analisa modal yang dilakukan pada poros dengan material AISI 1045 yaitu didapatkan enam mode shape seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.13 dengan nilai frekuensi natural masing-masing 501.49 Hz, 516.24 Hz, 629.11 Hz, 5451.9 Hz, 5452.5 Hz, dan 10444 Hz. Kerusakan struktural pada frekuensi tersebut ditunjukkan pada gambar 4.12 ditandai dengan deformasi yang besar sehingga menyebabkan kerusakan pada struktur poros.

Bedasarkan hasil simulasi yang didapat, nilai frekuensi natural dari poros masih jauh di atas dari nilai frekuensi operasional skuter listrik, yang beroperasi di rentang frekuensi 1-10 Hz sehingga kerusakan struktural akibat resonansi dapat dihindari

4.5 Respon Poros Terhadap Pembebanan Dinamis Pada Variasi Kecepatan Skuter Listrik

Dari Simulasi Random Vibration pada Ansys Workbench didapatkan deformasi dan *equivalent stress* pada poros saat mendapatkan pembebanan dinamis dari eksitasi jalan. Pembebanan dinamis yang diterapkan pada poros adalah pembebanan dinamis

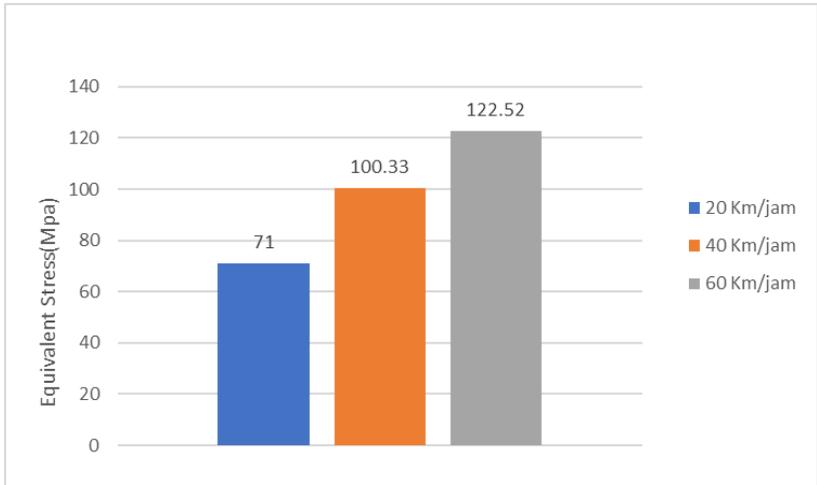
pada kecepatan skuter listrik 20 Km/jam, 40 Km/jam, dan 60 Km/jam pada profil jalan C.



Gambar 4.14 Deformasi Maksimum Poros Pada Variasi Kecepatan Skuter listrik

Gambar 4.14 menunjukkan hasil deformasi maksimum yang terjadi pada poros dengan material AISI 1020 di profil jalan C pada kecepatan 20 Km/jam, 40 Km/jam, dan 60 Km/jam. Deformasi maksimum poros pada kecepatan 20 Km/jam adalah 0.004259 mm. Deformasi maksimum poros pada kecepatan skuter 40 Km/jam adalah 0.0059953 mm. Deformasi maksimum poros pada kecepatan 60 Km/jam adalah sebesar 0.0073 mm.

Bedasarkan hasil simulasi pada gambar 4.14, deformasi pada poros bertambah besar seiring dengan bertambahnya kecepatan skuter listrik. Hal ini dikarenakan nilai *power spectral density* yang diterapkan pada poros semakin tinggi seiring dengan bertambahnya kecepatan skuter listrik



Gambar 4.15 Equivalent Stress Maksimum Poros Pada Variasi Kecepatan Skuter Listrik

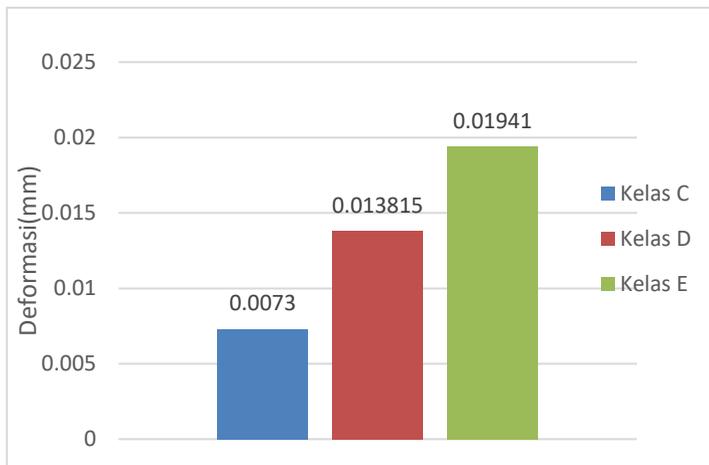
Gambar 4.15 menunjukkan *equivalent stress* maksimum pada poros dengan material AISI 1020 di kelas jalan C pada kecepatan skuter listrik 20 Km/jam, 40 Km/jam, dan 60 Km/jam. *Equivalent stress* maksimum poros pada kecepatan skuter listrik 20 Km/jam adalah 71 Mpa, *Equivalent stress* maksimum poros pada kecepatan skuter listrik 40 Km/jam adalah 100.33 Mpa. *Equivalent Stress* maksimum poros pada kecepatan skuter listrik 60 Km/jam adalah 122.52 Mpa.

Bedasarkan hasil simulasi pada gambar 4.15 *equivalent stress* poros menunjukkan nilai yang semakin tinggi seiring bertambahnya kecepatan skuter listrik. Hal ini dikarenakan *power spectral density* yang diterapkan pada poros semakin besar dengan bertambahnya kecepatan skuter listrik.

Bedasarkan hasil simulasi,poros dengan material AISI 1020 yang beroperasi pada kecepatan maksimum skuter listrik, yaitu 60 km/jam di profil jalan C aman digunakan. Hal ini dikarenakan nilai *equivalent stress* masih dibawah nilai *yield strength* material AISI 1020 yang memiliki *yield strength* sebesar 345 Mpa.

4.6 Respon Poros Terhadap Pembebanan Dinamis Pada Variasi Kelas Jalan

Dari simulasi random vibration menggunakan Ansys workbench,didapatkan respon deformasi dan *equivalent stress* poros pada skuter listrik yang beroperasi pada kecepatan 60 km/jam di profil jalan dengan kualitas yang berbeda, yaitu profil jalan C, D, dan E yang mengacu pada kategori kelas jalan dari ISO 8680.

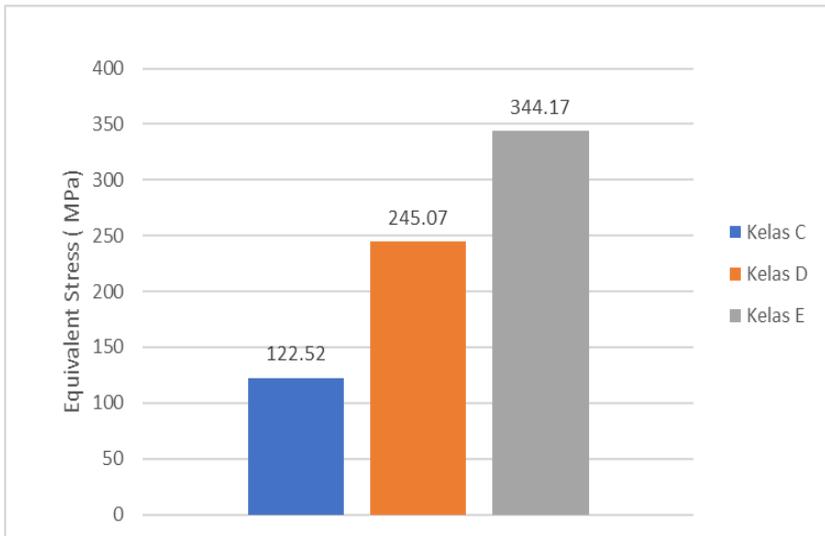


Gambar 4.16 Deformasi Maksimum Pada Variasi Kelas Jalan

Gambar 4.16 menunjukkan hasil deformasi maksimum yang diterima poros dengan material AISI 1020 pada kecepatan maksimum skuter listrik, yaitu 60 km/jam di tiga profil jalan yang berbeda. Deformasi yang didapatkan pada profil jalan C adalah

0.0073mm. Deformasi yang didapatkan pada profil jalan D adalah 0.013815mm. Deformasi yang didapatkan pada profil jalan E adalah 0.01941mm.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kelas jalan dengan kualitas yang berbeda berpengaruh signifikan terhadap deformasi struktur poros. Deformasi struktur poros semakin besar seiring dengan kualitas jalan yang semakin buruk. Tipe kelas jalan C memiliki kualitas jalan dengan kategori *average*, kelas jalan D memiliki kualitas jalan dengan kategori *poor*, dan kelas jalan E memiliki kualitas jalan dengan kategori *very poor*. Semakin menurun kualitas dari suatu jalan maka semakin besar eksitasi yang dihasilkan dari suatu jalan. Eksitasi jalan yang semakin besar menyebabkan nilai *power spectral density* yang diterima oleh poros menjadi semakin tinggi sehingga membuat deformasi yang terjadi pada struktur poros menjadi semakin besar



Gambar 4.17 *Equivalent Stress* Maksimum Pada Variasi Kelas Jalan

Gambar 4.17 menunjukkan *equivalent stress* pada poros dengan material AISI 1020 pada kecepatan 60 km/jam di tipe jalan ISO 8680 kelas C,D,dan E. Nilai *equivalent stress* yang didapatkan untuk kelas jalan C adalah 122.52 Mpa. Nilai *equivalent stress* yang untuk kelas jalan D adalah 245.07 Mpa. Nilai *equivalent stress* untuk kelas jalan E adalah 344.17 Mpa.

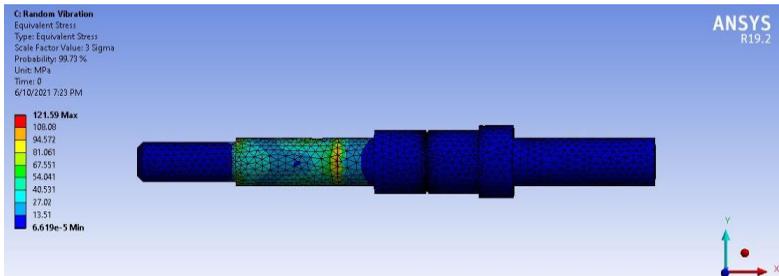
Hasil simulasi menunjukkan bahwa kualitas jalan berpengaruh signifikan terhadap *equivalent stress* pada struktur poros. Semakin menurun kualitas dari suatu jalan maka semakin besar eksitasi yang dihasilkan dari suatu jalan. Eksitasi jalan yang semakin besar menyebabkan nilai *power spectral density* yang diterima oleh poros menjadi semakin tinggi sehingga membuat *equivalent stress* yang terjadi pada struktur poros menjadi semakin besar

Berdasarkan hasil simulasi, desain poros dengan material AISI 1020 yang beroperasi pada kecepatan maksimum skuter listrik, yaitu 60 Km/jam di profil jalan C, D, dan E aman digunakan. Hal ini dikarenakan nilai *equivalent stress* pada poros masih berada dibawah yield strength material AISI 1020 yaitu 345 Mpa sehingga struktur poros masih mampu menerima beban dinamis pada kualitas jalan dengan kategori *very poor* meskipun dengan margin yang sangat sedikit dimana nilai *equivalent stress* pada profil jalan kelas E yaitu 344.17 Mpa sedangkan nilai *yield strength* dari material *carbon steel* AISI 1020 adalah 345 Mpa.

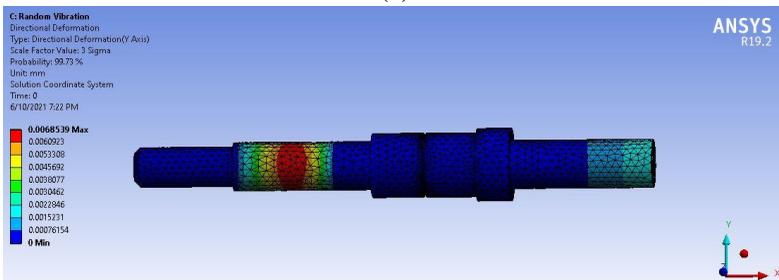
4.7 Respon Poros Terhadap Pembebanan Dinamis Pada Variasi Material

Material *carbon steel* AISI 1020 dan *carbon steel* AISI 1045 memiliki beberapa properties material yang berbeda. *Carbon steel* AISi 1020 merupakan low carbon steel karena memiliki komposisi carbon 0.18-0.23 persen sedangkan carbon steel AISI 1045 merupakan medium carbon steel dengan komposisi carbon 0.43-0.5 persen. Material carbon steel AISI 1020 memiliki modulus

young dengan nilai 200 Gpa serta yield strength dengan nilai 345 Mpa. Material carbon steel AISI 1045 memiliki modulus young dengan nilai 212 Gpa serta *yield strength* dengan nilai 450 Mpa. Respon poros terhadap pembebanan dinamis pada material carbon steel AISI 1020 dan carbon steel AISI 1045 didapatkan dari simulasi random vibration menggunakan Ansys workbench.



(a)

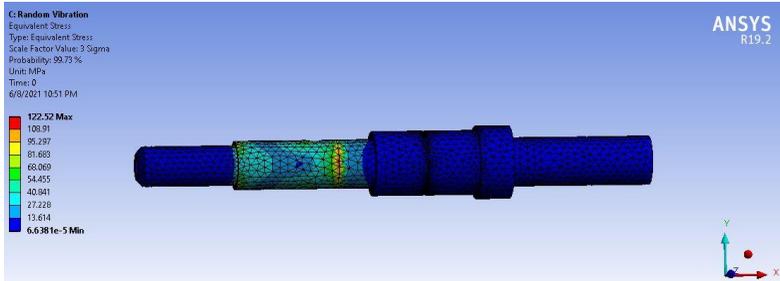


(b)

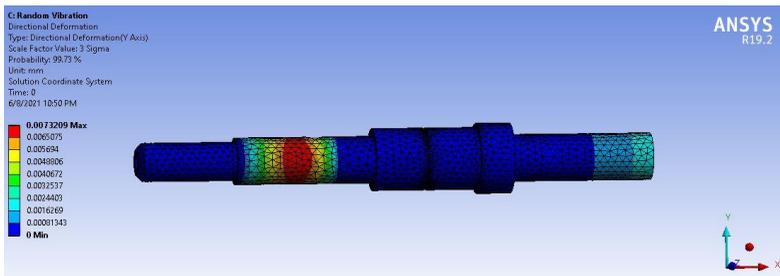
Gambar 4.18 Respon Dinamis Poros AISI 1045 a)Equivalent Stress b)Deformasi

Gambar 4.18 menunjukkan respon dinamis poros dengan material *carbon steel* AISI 1045 pada kecepatan maksimum skuter listrik, yaitu 60 km/jam di profil jalan C. Pembebanan dinamis yang diterapkan pada poros menyebabkan terjadinya deformasi struktur

poros sebesar 0.006853 mm serta *equivalent stress* pada struktur poros sebesar 121.59 Mpa.



(a)



(b)

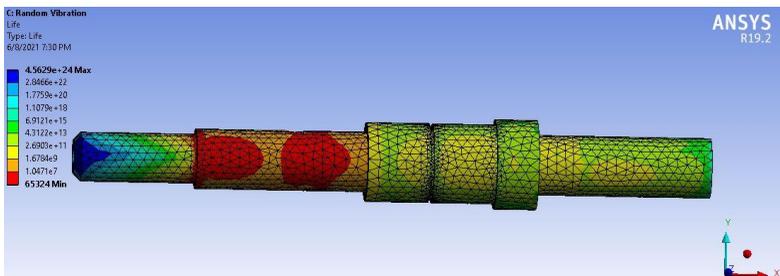
Gambar 4.19 Respon Dinamis Poros AISI 1020 a)*Equivalent Stress* b)*Deformasi*

Gambar 4.19 menunjukkan respon dinamis poros dengan material carbon steel AISI 1020 pada kecepatan maksimum skuter listrik, yaitu 60 km/jam di profil jalan C. Pembebanan dinamis yang diterapkan pada poros menyebabkan terjadinya deformasi struktur poros sebesar 0.0073209 mm serta *equivalent stress* pada struktur poros sebesar 122.52 Mpa.

Poros dengan material carbon steel AISI 1020 memiliki deformasi serta *equivalent stress* yang lebih tinggi dari poros dengan material carbon steel AISI 1045. Deformasi dan *Equivalent stress* yang lebih tinggi pada material *carbon steel* AISI 1020 dikarenakan nilai modulus young yang lebih rendah pada carbon steel AISI 1020. Nilai modulus young yang lebih rendah membuat menurunnya kemampuan material untuk menahan deformasi pada struktur serta *equivalent stress* pada struktur poros yang lebih tinggi. Perbedaan deformasi dan *equivalent stress* pada material *carbon steel* AISI 1020 dan *carbon steel* AISI 1045 tidak terlalu signifikan karena material *low carbon steel* dan *medium carbon steel* tidak memiliki material properties yang jauh berbeda.

4.8 Fatigue Life Poros Pada Pembebanan Dinamis

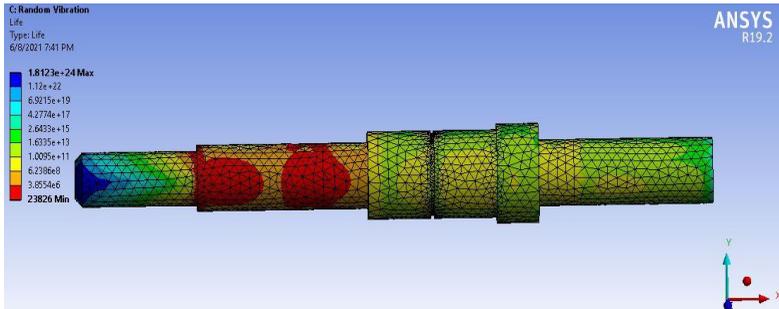
Analisa fatigue dilakukan untuk mengetahui *fatigue life* pada poros setelah mendapatkan *fatigue damage* dari pembebanan dinamis secara berulang, yang merupakan *power spectral density* yang didapatkan dari eksitasi jalan di profil C ISO 8680 pada kecepatan 20 km/jam, 40km/jam, dan 60km/jam.



Gambar 4.20 Fatigue Life Poros Pada Kecepatan 20 Km/jam

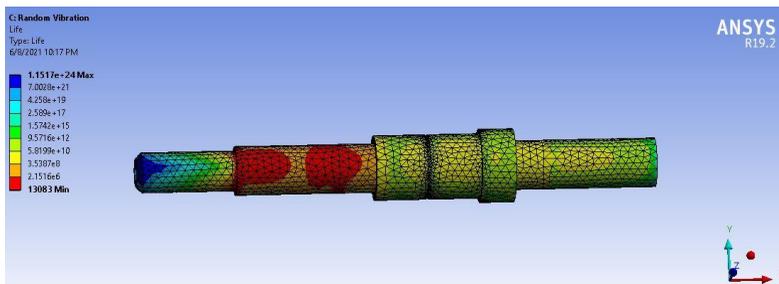
Gambar 4.20 menunjukkan *fatigue life* poros setelah mendapatkan pembebanan dinamis secara berulang pada kecepatan skuter listrik 20 km/jam. *Life* maksimum dari poros adalah $4.529e+24$ cycles

sedangkan *life* minimum yang berada pada design poros adalah 65324 cycle



Gambar 4.21 Fatigue Life Poros Pada Kecepatan 40 Km/jam

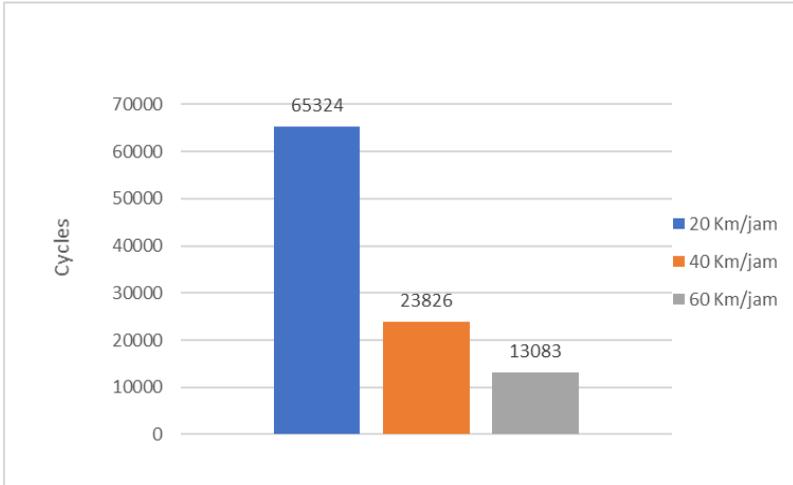
Gambar 4.21 menunjukkan *fatigue life* pada poros setelah mendapatkan pembebanan dinamis berulang pada kecepatan skuter listrik 40 km/jam. *Life* maksimum pada poros adalah $1.812e+24$ cycles sedangkan *life* minimum pada poros adalah 23826 cycles.



Gambar 4.22 Fatigue Life Poros Pada Kecepatan 60 Km/jam

Gambar 4.22 menunjukkan *fatigue life* pada poros setelah mendapatkan pembebanan dinamis berulang pada kecepatan skuter listrik 60 km/jam. *Life* maksimum yang terdapat pada poros adalah

$1.1517e+24$ cycles sedangkan life minimum yang terdapat pada poros adalah 13083 cycles.



Gambar 4.33 Fatigue Life Pada Variasi Kecepatan

Bedasarkan grafik pada gambar 4.33 dapat disimpulkan bahwa dengan semakin besarnya kecepatan dari skuter listrik, maka *fatigue life* dari poros akan semakin rendah. Hal ini dikarenakan kecepatan yang lebih tinggi membuat *displacement* dari eksitasi jalan yang semakin besar. Dengan semakin besarnya *displacement*, maka akan semakin tinggi *power spectral density* yang berlaku pada poros. *Power spectral density* mempengaruhi *equivalent stress* dari poros. Poros memiliki *equivalent stress* yang lebih tinggi ketika diberlakukan *power spectral density* yang lebih besar pada poros.

Pembebanan dinamis yang berulang menyebabkan terjadinya *fatigue damage* pada struktur poros. *Power spectral density* yang lebih besar membuat *fatigue damage* yang lebih tinggi pada

struktur poros sehingga membuat *fatigue life* dari poros menjadi semakin pendek.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis data dan pembahasan dari karakteristik grafik pada setiap simulasi, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Telah dilakukan perancangan ulang poros dari poros dengan tipe *multi shaft* menjadi poros dengan tipe *single shaft*. Poros yang dirancang ulang merupakan poros dengan jenis *hollow shaft* yang memiliki dimensi dengan panjang 183 mm serta diameter 14 mm, 17 mm, 22.5 mm, dan 25.5 mm.
2. Deformasi yang terdapat pada poros setelah mendapatkan pembebanan statis adalah 0.001032 untuk material AISI 1045 dan 0.0010932 untuk material AISI 1020. *Equivalent stress* yang didapat adalah 33.132 Mpa untuk material AISI 1045 dan material AISI 1020. Hal ini menunjukkan bahwa poros masih aman untuk digunakan pada pembebanan statis.
3. Hasil dari analisa modal yang dilakukan pada poros dengan material AISI 1045 yaitu didapatkan enam *mode shape* dengan nilai frekuensi natural masing-masing 501.49 Hz, 516.24 Hz, 629.11 Hz, 5451.9 Hz, 5452.5 Hz, dan 10444 Hz yang masih jauh berada diatas frekuensi operasi poros sehingga fenomena resonansi dapat dihindari.
4. Besarnya *power spectral density* pada poros dipengaruhi oleh kecepatan skuter listrik serta kualitas dari tipe jalan. *Power spectral density* terbesar untuk kecepatan skuter listrik 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam adalah $16.26 (m/s^2)^2/Hz$, $32.9(m/s^2)^2/Hz$, $49.37(m/s^2)^2/Hz$. Hasil *power spectral density* tertinggi yang didapatkan pada kecepatan 60

km/jam untuk kelas C, kelas D, dan kelas E adalah $49.37(m/s^2)^2/Hz$, $198(m/s^2)^2/Hz$, dan $402(m/s^2)^2/Hz$. Semakin tinggi kecepatan skuter listrik maka semakin besar *power spectral density* yang dihasilkan. Semakin buruk kualitas dari jalan maka semakin besar *power spectral density* yang dihasilkan dari eksitasi jaalan

5. Perbedaan *material properties* dari *carbon steel* AISI 1045 dan *carbon steel* AISI 1020 menyebabkan perbedaan respon deformasi dan *equivalent stress* pada pembebanan statis dan dinamis. Nilai deformasi dan *equivalent stress* yang terdapat pada material AISI 1045 setelah mendapatkan pembebanan dinamis pada kecepatan 60 km/jam di profil jalan C adalah sebesar 0.006853 mm dan 121,59 Mpa sedangkan nilai deformasi dan *equivalent stress* untuk material AISI 1020 adalah 0.007302 mm dan 122.52 Mpa. Nilai modulus young yang lebih kecil pada material *carbon steel* AISI 1020 menyebabkan deformasi serta *equivalent stress* yang lebih tinggi dibanding material *carbon steel* AISI 1045 pada pembebanan dinamis.
6. Semakin tinggi kecepatan skuter listrik menyebabkan respon struktural deformasi dan *equivalent stress* yang lebih tinggi pada poros Deformasi maksimum poros dengan material AISI 1020 di profil jalan C pada kecepatan 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam adalah 0.004259 mm, 0.0059953 mm, dan 0.0073 mm serta *equivalent stress* maksimum poros pada kecepatan skuter listrik 20 Km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam adalah 71 Mpa, 100.33 Mpa, dan 122.22 Mpa. Hal ini dikarenakan struktur poros mendapatkan *power spectral density* yang semakin tinggi dengan bertambahnya kecepatan.
7. Semakin menurunnya kualitas jalan menyebabkan respon structural deformasi dan *equivalent stress* yang lebih tinggi pada poros. Deformasi yang didapatkan pada profil jalan C, D, dan E adalah 0.0073mm, 0.013815mm, dan 0.01941mm. Nilai

equivalent stress yang didapatkan untuk kelas jalan C, D, dan E adalah 122.52 Mpa, 245.07 Mpa, dan 344.17 Mpa. Hal ini dikarenakan struktur poros mendapatkan *power spectral density* yang lebih tinggi seiring dengan menurunnya kualitas jalan.

8. *Fatigue life* pada poros menjadi semakin pendek dengan semakin besarnya *power spectral density* pada struktur poros. Hal ini dapat dilihat dari *fatigue life* poros yang semakin pendek seiring dengan bertambahnya kecepatan skuter listrik. *Fatigue life* yang terdapat pada kecepatan skuter listrik 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam adalah 65324 *cycles*, 23826 *cycles*, dan 13086 *cycles*. *Power spectral density* yang lebih tinggi menyebabkan *fatigue damage* yang lebih besar pada struktur poros sehingga *fatigue life* dari poros menjadi semakin pendek.

5.2 Saran

1. Simulasi untuk mengetahui respon poros terhadap pembebanan dinamis pada kelas jalan A dan B akan lebih relevan untuk dilakukan karena penggunaan skuter listrik ditunjukkan untuk operasi di jalan perkotaan.

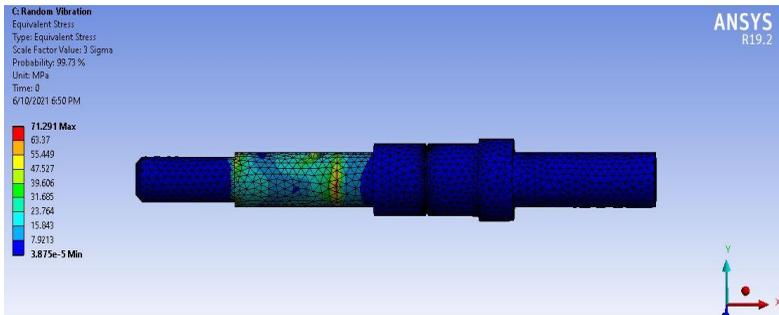
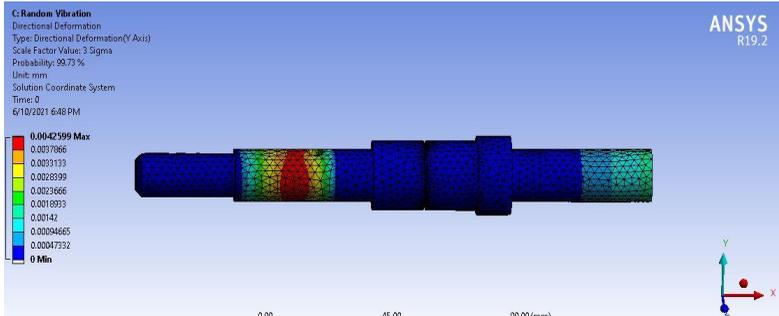
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Agnihotri,R,&Dwivedi,A.(2018) Finite Element Analysis For Front Axle Of Two Wheeler Company-Case Of Algeria .International Journal Of Research Science & Management ,1-5.
- [2] Budynas, Richard G., Nisbett, J. Keith. (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design Ninth Edition*.New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [3] Prakash, D. S., & Rangarajan, V. (2017). *Vibration Analysis in a Motor Cycle Using FEM*. 1–6.
- [4] ISO 8680. (1995). INTERNATIONAL STANDARD ISO Mechanical vibration, road surface profiles. Reporting of Measured Data. 8608
- [5] Liu, Y. (2003). introduction to the Finite Element Method. Mechanical Engineering Department University of Cincinnati.
- [6] Kurniawan, M. P., Chonhenchob, V., Singh, S. P., & Sittipod, S. (2015). Measurement and Analysis of Vibration Levels in Two and Three Wheel Delivery Vehicles in Southeast Asia. *Packaging Technology and Science*, 28(9), 836–850.
- [7] Kolgiri, S. G. (2009). *Static and Dynamic Analysis for Rotor Shaft of Electric Motor*. January 2008.
- [8] Russel Hibbeler. (2017). Mechanics of Materials Tenth Edition in SI Units (10th ed.).
- [9] Wang, J., & Qiang, B. (2017). Road simulation for four-wheel vehicle whole input power spectral density. *AIP Conference Proceedings*, 1839(May 2017). <https://doi.org/10.1063/1.4982512>
- [10] Rao, Singresu S. (2011). *Mechanical Vibration Fifth Edition*. New Jersey: Pearson Education, Inc. He,

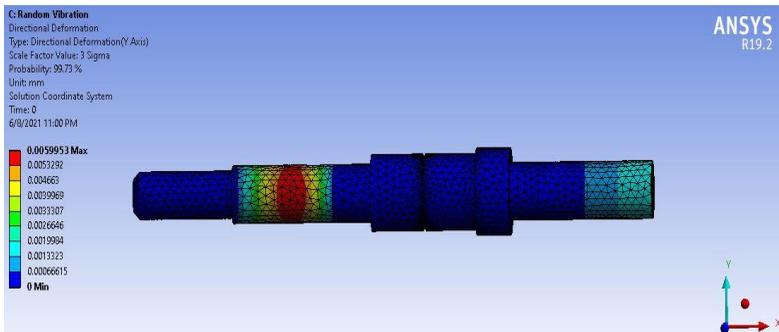
- [11] Sathishkumar, K., & Ugesh, N. (2016). Finite element analysis of a shaft subjected to a load. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(9), 5996–6000.
- [12] R., & Wang, J. C. (2020). Vertical vibration control of an in-wheel motor-driven electric vehicle using an in-wheel active vibration system. *Asian Journal of Control*, 22(2), 879–896. <https://doi.org/10.1002/asjc.1948>
- [13] Zhou, H., & Wang, Z. W. (2018). Measurement and analysis of vibration levels for express logistics transportation in South China. *Packaging Technology and Science*, 31(10), 665–678. <https://doi.org/10.1002/pts.2404>

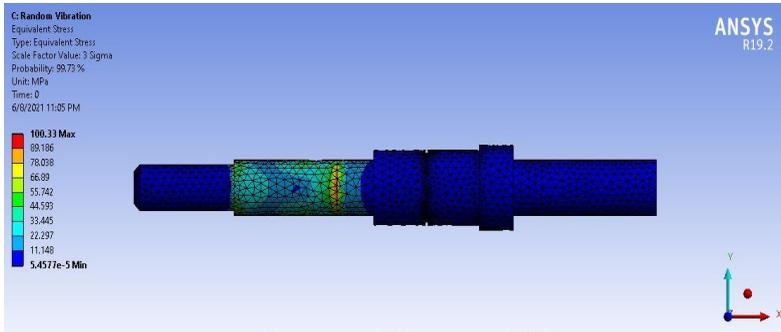
LAMPIRAN A

-Deformasi dan Equivalent Stress Pada 20 Km/jam

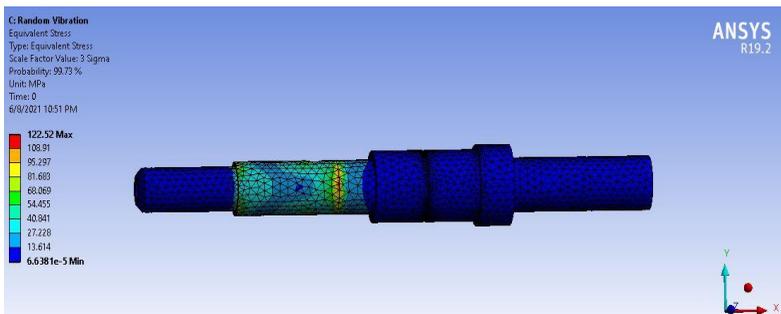
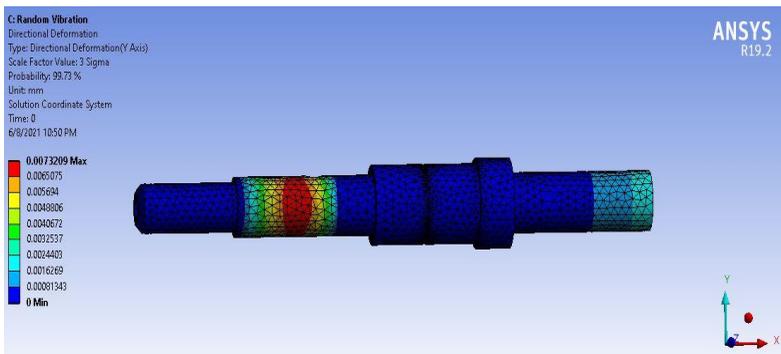


-Deformasi dan Equivalent Stress Pada Kecepatan 40 Km/jam



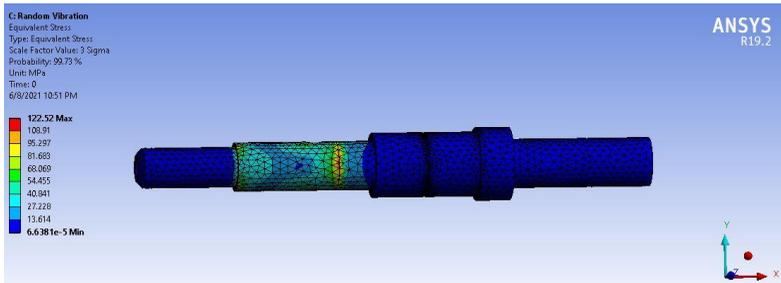
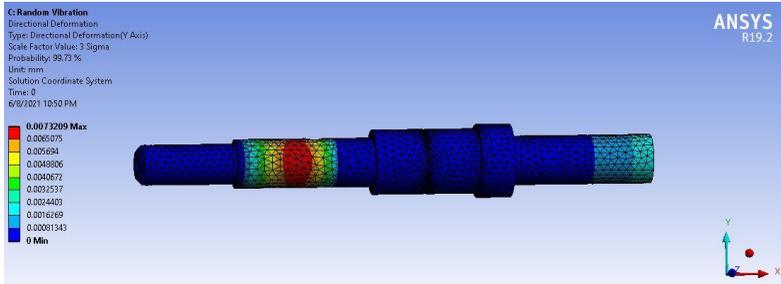


-Deformasi dan Equivalent Stress Pada Kecepatan 60 Km/jam

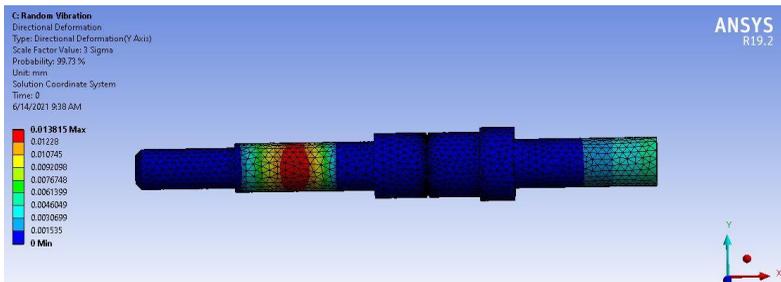


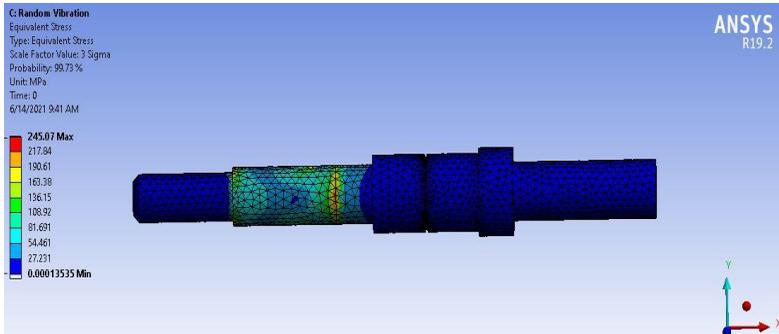
LAMPIRAN B

-Deformasi dan Equivalent Stress Pada Kelas Jalan C

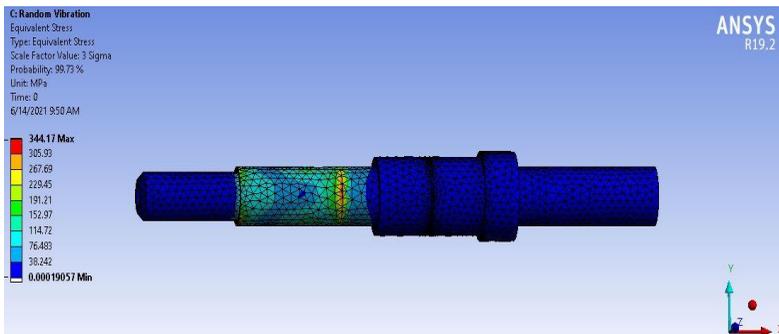
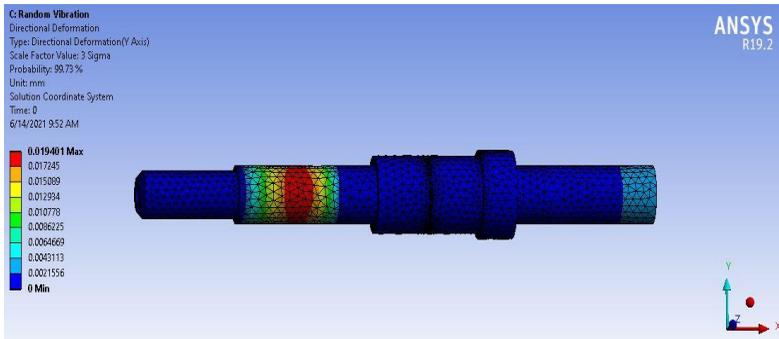


-Deformasi dan Equivalent Stress Pada Kelas Jalan D





-Deformasi dan Equivalentt Stress pada Kelas Jalan E



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Rasyid Mutazsiraj Yosseffano dilahirkan di Samarinda, 23 Februari 1999 merupakan anak yang terlahir dari orangtua bernama Bapak Irfan Yosseffano Nizardo dan Ibu Tengku Shaska Atiza. Riwayat pendidikan penulis diawali di Madrasah Pembangunan UIN Jakarta selama 6 tahun dari tahun 2005-2011, kemudian masuk SMP Negeri 161 Jakarta selama 3 tahun dari tahun 2011-2014, dan SMA Negeri 34 Jakarta dari tahun 2014-2017.

Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya

.Penulis menyadari akan banyaknya hal yang penulis belum mengerti serta adanya hal yang penulis tidak tau bahwa penulis tidak mengerti. Oleh karena itu penulis ingin terus belajar dari berbagai disiplin ilmu untuk memiliki *mental models* yang lebih luas dan akurat. Jika ada yang ingin ditanyakan lebih lanjut tentang tugas akhir ini dapat menghubungi penulis lewat email penulis, rasyidyosseffano@gmail.com