



TUGAS AKHIR - TM 91486

# **ANALISA KENYAMANAN KENDARAAN ANGKUT MASSAL DENGAN PEMODELAN PENGEMUDI SEBAGAI SISTEM MULTI-DOF**

NAVA AMALIA  
NRP. 2110 100 080

Dosen Pembimbing:  
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST, M.Eng

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - TM 91486

# **COMFORT ANALYSIS OF PUBLIC TRANSPORTATION WITH DRIVER MODELING AS MULTI-DOF SYSTEM**

NAVA AMALIA  
NRP. 2110 100 080

Academic Supervisor:  
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST, M.Eng

DEPARTEMEN OF MECHANICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2014

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISA KENYAMANAN KENDARAAN ANGKUT MASSAL DENGAN PEMODELAN PENGEMUDI SEGABAGAI SISTEM MULTI-DOF

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Sistem Dinamis dan Vibrasi  
Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Nava Amalia**

Nrp. 2110 100 080

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST, M.Eng. .... (Pembimbing I)  
(NIP. 19750511 19990310 01)
2. Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST, M.Eng. Sc. .... (Penguji I)  
(NIP. 19780510 20011210 01)
3. Ir. J. Lubi. .... (Penguji III)  
(NIP. 19480220 19760310 01)

**SURABAYA**  
**Juni, 2014**

# ANALISA KENYAMANAN KENDARAAN ANGKUT MASSAL DENGAN PEMODELAN PENGEMUDI SEBAGAI SISTEM MULTI-DOF

**Nama Mahasiswa** : Nava Amalia  
**NRP** : 2110 100 080  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur,  
ST, M.Eng

## **Abstrak**

*Kendaraan umum atau alat transportasi massal merupakan suatu kendaraan yang sering digunakan oleh masyarakat Indonesia yang tidak memiliki kendaraan pribadi yang bepergian. Alat transportasi massal yang dapat digunakan untuk menempuh perjalanan antar kota adalah kereta dan bus. Namun, masyarakat lebih menyukai menggunakan bus untuk melakukan perjalanan jauh karena waktunya lebih flexible dibandingkan kereta api. Supir bus menempuh perjalanan yang jauh sehingga mereka lelah. Hal ini dipengaruhi oleh tingkat kenyamanan mengemudi. Kenyamanan dalam berkendara merupakan hal yang penting karena kelelahan yang dialami supir dapat menyebabkan terjadinya kecelakaan*

*Pada tugas akhir ini akan dimodelkan dan disimulasikan dinamika kendaraan angkut massal (bus) dan pengemudinya dengan menggunakan software Simulink Matlab. Hasil simulasi berupa respon dinamis (perpindahan, kecepatan, percepatan) dari pengemudi bus dianalisa dan ditinjau dari standar kenyamanan. Selain itu, akan dianalisa mengenai frequency respon untuk mengetahui perbandingan input dan output yang diberikan pada kendaraan. Input yang diberikan berupa step dan harmonik.*

*Untuk input sinusoidal dengan amplitudo 0,01 m dan kecepatan 40 km/jam RMS percepatan hasil simulasi pengemudi pada bagian kepala, dada, perut dan pinggul pengemudi adalah 0,1799 m/s<sup>2</sup>, 0,1811 m/s<sup>2</sup>, 0,171 m/s<sup>2</sup>, dan 0,1824 m/s<sup>2</sup> yang*

menurut standar ISO 2631 berada pada kondisi tidak ada keluhan. Pada kecepatan 100 km/jam RMS percepatan hasil simulasi pengemudi pada bagian kepala, dada, perut dan pinggul pengemudi berturut-turut adalah  $0,4844 \text{ m/s}^2$ ,  $0,4853 \text{ m/s}^2$ ,  $0,4669 \text{ m/s}^2$ , dan  $0,474 \text{ m/s}^2$  yang menurut standar ISO 2631 berada pada kondisi sedikit tidak nyaman. Pada amplitudo maksimum yaitu 0,03 m pada kecepatan 40 km/jam RMS percepatan hasil simulasi pengemudi pada bagian kepala, dada, perut dan pinggul adalah  $0,5398 \text{ m/s}^2$ ,  $0,5431 \text{ m/s}^2$ ,  $0,5144 \text{ m/s}^2$ , dan  $0,5466 \text{ m/s}^2$  yang menurut standar ISO 2631 berada pada kondisi sedikit tidak nyaman. Pada kecepatan 100 km/jam RMS percepatan yang dialami pengemudi pada bagian kepala, dada, perut, dan pinggul berturut-turut adalah  $1,454 \text{ m/s}^2$ ,  $1,447 \text{ m/s}^2$ ,  $1,074 \text{ m/s}^2$ , dan  $1,395 \text{ m/s}^2$  menurut standar ISO 2631 berada pada kondisi sangat tidak nyaman.

**Kata kunci:** pemodelan sistem dinamis, transportasi massal darat, dinamika bus dan pengemudinya, kenyamanan berkendara.

# COMFORT ANALYSIS OF PUBLIC TRANSPORTATION WITH DRIVER MODELING AS MULTI-DOF SYSTEM

**Student Name** : Nava Amalia  
**NRP** : 2110 100 080  
**Departement** : Mechanical Engineering FTI - ITS  
**Academic Supervisor** : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur,  
ST, M.Eng

## Abstract

*Public transportation or mass transportation is a vehicle that is often used by Indonesian citizen who does not have a personal vehicle for traveling. Mass transportation that can be used to travel between cities are train and bus. However, people prefer to use bus rather than train because travelling by bus is more flexible than train. Bus driver is easily to get tired because the journey was taken a lot of distance. It is effected by the level of driving comfort. Ride comfort is important because driver exhaustion can cause accident.*

*In this final project, there will be a modelling and simulation of the dynamics of mass transportation. The results of the simulation is analysis of dynamic response (displacement, velocity, acceleration) of the bus driver due to standard of comfort. In addition, the frequency response will be analyzed to determine the ratio of input and output which were provided from the vehicle. Input is given in the form of step and harmonic.*

*For a sinusoidal input with amplitude of 0.01 m and speed of 40 km / h, simulation results of driver RMS acceleration on the head, chest, abdomen and hips driver are 0.1799 m / s<sup>2</sup>, 0.1811 m / s<sup>2</sup>, 0.171 m / s<sup>2</sup>, and 0.1824 m / s<sup>2</sup> which according to ISO 2631 standards in zero complaint condition. At speed of 100 km / h, simulation results of driver RMS acceleration on the head, chest, abdomen and hips driver are 0.4844 m / s<sup>2</sup>, 0.4853 m / s<sup>2</sup>, 0.4669 m / s<sup>2</sup>, and 0.474 m / s<sup>2</sup> which according to ISO 2631 standards in little uncomfortable condition. At the maximum amplitude of*

*0.03 m at speed of 40 km / h, simulation results of driver RMS acceleration on the head, chest, abdomen and hips are 0.5398 m / s<sup>2</sup>, 0.5431 m / s<sup>2</sup>, 0.5144 m / s<sup>2</sup>, and 0.5466 m / s<sup>2</sup> which according to ISO 2631 standards in little uncomfortable condition. At a speed of 100 km / h, simulation results of driver RMS acceleration on the head, chest, abdomen, and hips driver are 1,454 m / s<sup>2</sup>, 1,447 m / s<sup>2</sup>, 1.074 m / s<sup>2</sup>, and 1,395 m / s<sup>2</sup> according to ISO 2631 standards in very uncomfortable condition.*

**Keywords:** *modeling of dynamic systems, land mass transportation, bus and driver dynamics, ride comfort.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur panulis panjatkan hanya kehadiran Allah SWT, Pemelihara seluruh alam raya, yang atas limpahan rahmat, taufik dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam bagi junjungan kita Rasulullah Muhammad Shallallahu'alaihi Wasallam, sehingga penulis mampu menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Analisa Kenyamanan Kendaraan Angkut Massal dengan Pemodelan Pengemudi sebagai Sistem Multi - DOF” ini.

Laporan tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu matakuliah dan juga salah satu syarat kelulusan sarjana di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini bukanlah tujuan akhir dari belajar karena belajar tidak ada batasnya. Terselesaikannya laporan ini tentunya tak lepas dari dorongan dan uluran tangan berbagai pihak. Oleh karena itu, tak salah kiranya penulis mengungkapkan terima kasih dan penghargaan kepada :

1. Bapak Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST, M. Eng, selaku dosen pembimbing yang dengan sabar meluangkan waktu membina dan mengarahkan penulis.
2. Ibu Sri Hartutik dan adek Ferdian Nirmala yang tercinta yang tak ada hentinya memberi dorongan serta do'anya.
3. Almarhum Bapak Rawuh dan Almarhumah adek Elsa Margareta atas nasehat dan dukungan yang telah diberikan selama masih hidup.
4. Bapak Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST., M. Eng. Sc. dan Ir. J.Lubi selaku dosen penguji yang telah menyediakan waktu luang dan memberikan masukan untuk kesempurnaan penelitian ini.
5. Bapak Menteri Pendidikan Nasional M. Nuh atas program Bidik Misi sehingga penulis dapat berkuliah di Teknik Mesin ITS.
6. Bapak Ir. Bambang Daryanto, MSME., Ph.D selaku dosen wali yang selalu memberikan nasehat selama berkuliah.

7. Dwi Ismawati dan Chika Olviani sebagai teman menyusun tugas akhir yang selalu memberikan semangat dan bantuan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
8. Mas Dimas Angga Pradiga yang membantu tambahan pengetahuan untuk masukan tugas akhir dan selama kuliah di Teknik Mesin ITS.
9. Untuk teman-teman seperjuangan Bidik Misi, Danny, Arfi, Fitri, Gallih, Supri, Tyas, Ageng, Dany, Endah dan Acong.
10. Endry Zhulham Pratama dan Erni Zulfa Arini atas pinjaman laptop selama penyusunan tugas akhir ini.
11. Teman-teman kosan lama: Puput, Nafi, Ruri, Iis, Ika, dan Malik.
12. Adik M55: Dewi, Rahma, Fira, Tari, Fitroh, dan Rambo.
13. Seluruh rekan-rekan di Lab. Desain dan Harus LG Research Group dan seluruh rekan seperjuangan.
14. Seluruh teman-teman M-53 yang tidak bisa disebutkan yang telah bersedia menjadi bagian dari sekeping bagian perjalanan hidup.
15. Semua pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini.

Semoga Allah SWT mambalas kebaikan dan ketulusan semua pihak yang telah membantu menyelesaikan tugas akhir ini dengan melimpahkan rahmat dan karunia-Nya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan kabaikan bagi banyak pihak demi kemaslahatan bersama serta bernilai ibadah di hadapan Allah SWT Amin.

Surabaya, 23 Juli 2014

Penyusun

Nava Amalia

2110 100 080

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	xv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan Laporan.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI</b>	
2.1 Tinjauan Pustaka .....	5
2.2 Dasar Teori.....	9
2.2.1 Pengenalan Sistem Getaran .....	10
2.2.2 Getaran Sistem Multi-DOF.....	10
2.2.3 Motion of Base.....	13
2.2.4 Gerak Harmonik.....	14
2.2.5 <i>Pitching</i> dan <i>Bouncing</i> pada Setengah kendaraan.....	16
2.2.6 Kriteria Kenyamanan bagi Penumpang Kendaraan.....	17
2.2.7 State Variabel.....	23
<b>BAB III METODOLOGI</b>	
3.1 Metode Analisis.....	25
3.2 Tahap Studi Literatur.....	26
3.3 Tahap Permodelan Matematis Sistem .....	27
3.4 Tahap Pembuatan Persamaan Gerak Sistem .....	28
3.5 Tahap Pembuatan Blok Simulasi .....	29

3.6 Analisis Hasil .....	30
--------------------------	----

## **BAB IV PEMODELAN SISTEM**

4.1. Pemodelan Matematis .....	31
4.1.1. Pemodelan Matematis Setengah Kendaraan Angkut Massal (Bus) dengan Pengemudinya (8 DOF) .....	31
4.2. Pemodelan pada Matlab .....	35
4.2.1. Pemodelan <i>Time Response</i> .....	36
4.2.2. Pemodelan <i>Frequency Response</i> .....	37
4.3 Parameter Komponen Bus dan Pengemudi .....	38

## **BAB V ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN**

5.1. Respon Pengemudi dengan Pemodelan <i>Time Response</i> .....	41
5.1.1 Respon Pengemudi dengan Input Step .....	41
5.1.2 Respon Pengemudi dengan Input Sinusoidal .....	43
5.1.2.1. Respon Pengemudi pada Amplitudo 1 cm dengan Kecepatan 40, 60, dan 100 km/jam .....	45
5.1.2.2 Respon Pengemudi pada Amplitudo 2 cm dengan Kecepatan 40, 60, dan 100 km/jam .....	50
5.1.2.3 Respon Pengemudi pada Amplitudo 3 cm dengan Kecepatan 40, 60, dan 100 km/jam .....	56
5.2 Respon Pengemudi dengan Pemodelan <i>Frequency Response</i> .....	61
5.2.1 <i>Frequency Response</i> Pinggul Pengemudi .....	62
5.2.2 <i>Frequency Response</i> Perut Pengemudi .....	63
5.2.3 <i>Frequency Response</i> Dada Pengemudi .....	65
5.2.4 <i>Frequency Response</i> Kepala Pengemudi .....	66

## **BAB VI PENUTUP**

6.1 Kesimpulan .....	69
6.2 Saran .....	70

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pemodelan Kereta Api .....	5
Gambar 2.2	Pemodelan Seperempat Bus dan Pengendaranya.....	6
Gambar 2.3	Bus IK-301 .....	7
Gambar 2.4	Pemodelan Bus IK-301 .....	7
Gambar 2.5	Pemodelan Manusia.....	8
Gambar 2.6	Skema Analisa Sistem Getaran.....	10
Gambar 2.7	Sistem Pegas 2 DOF .....	11
Gambar 2.8	Sistem Pegas 2 DOF dengan Gaya Rotasi .....	12
Gambar 2.9	<i>Base Excitation</i> .....	13
Gambar 2.10	Rekaman Gerak Harmonik .....	14
Gambar 2.11	Proyeksi Gerak Harmonik Pada Lingkaran .	15
Gambar 2.12	Hubungan Simpangan, Kecepatan, dan Percepatan.....	16
Gambar 2.13	Mekanisme <i>Pitching</i> dan <i>Bouncing</i> .....	16
Gambar 2.14	Ketahanan Badan Manusia Terhadap Percepatan Linier yang Dapat Diterima .....	18
Gambar 2.15	Batas Getaran Vertikal yang diijinkan oleh Janeway .....	20
Gambar 2.16	Batasan Kelelahan Akibat Penurunan Kinerja Pengemudi akibat Getaran Vertikal.....	22
Gambar 3.1	Diagram Alir Pemodelan Pengendara Transportasi Massal (Bus) .....	26
Gambar 3.2	Model Matematis Pengendara Transportasi Massal (Bus) dan Kendaraannya .....	27
Gambar 3.3	Diagram Alir Pemodelan Matematis .....	28
Gambar 3.4	Diagram Alir Pemodelan pada Simulink Matlab .....	29
Gambar 4.1	Model Matematis Pengemudi Transportasi Massal (Bus) dan Kendaraannya .....	31
Gambar 4.2	(a) <i>Free Body Diagram Ban Depan</i> , (b) <i>Free Body Diagram Ban Belakang</i> .....	32

Gambar 4.3	(a) <i>Free Body Diagram</i> Chassis Kendaraan, (b) <i>Free Body Diagram</i> Pinggul Pengemudi, (c) <i>Free Body Diagram</i> Perut Pengemudi ...	33
Gambar 4.4	(a) <i>Free Body Diagram</i> Chassis Dada Pengemudi, (b) <i>Free Body Diagram</i> Kepala Pengemudi	34
Gambar 4.5	Diagram Blok Simulink Secara Keseluruhan	37
Gambar 4.6	Metode Bode Diagram pada Matlab	38
Gambar 5.1	Profil Eksitasi Impuls	41
Gambar 5.2	Grafik <i>Time Response</i> Bagian Tubuh Pengemudi dengan Input Step (a) Perpindahan ( <i>Displacement</i> ), (b) Kecepatan ( <i>Velocity</i> ), dan (c) Percepatan ( <i>Acceleration</i> .....	42
Gambar 5.3	Profil Eksitasi Sinusoidal.....	44
Gambar 5.4	Sumber Eksitasi Sinusoidal dengan amplitudo 1 cm dan variasi kecepatan: (a) $v_1=20$ km/jam, (b). $v_2=60$ km/jam, (c). $v_3=100$ km/jam .....	44
Gambar 5.5	Grafik <i>Time Response</i> Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Perpindahan ( <i>Displacement</i> ) pada kec. 40 km/jam, (b). Perpindahan ( <i>Displacement</i> ) pada kec. 60 km/jam, (c). Perpindahan ( <i>Displacement</i> ) pada kec. 100 km/jam .....	45
Gambar 5.6	Grafik <i>Time Response</i> Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Kecepatan ( <i>Velocity</i> ) pada kec. 40 km/jam, (b). Kecepatan ( <i>Velocity</i> ) pada kec. 60 km/jam, (c). Kecepatan ( <i>Velocity</i> ) pada kec. 100 km/jam .....	47
Gambar 5.7	Grafik <i>Time Response</i> Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Percepatan ( <i>Acceleration</i> ) pada kec. 40 km/jam (b). Percepatan ( <i>Acceleration</i> ) pada kec.60 km/jam, (c). Percepatan ( <i>Acceleration</i> ) pada kec. 100 km/jam .....	48

Gambar 5.8	Grafik Nilai RMS Percepatan Bagian Tubuh Pengemudi Untuk Kecepatan yang Bervariasi.....	49
Gambar 5.9	Grafik <i>Time Response</i> Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Perpindahan ( <i>Displacement</i> ) pada kec. 40 km/jam, (b). Perpindahan ( <i>Displacement</i> ) pada kec. 60 km/jam, .... (c). Perpindahan ( <i>Displacement</i> ) pada kec. 100 km/jam.....	51
Gambar 5.10	Grafik <i>Time Response</i> Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Kecepatan ( <i>Velocity</i> ) pada kec. 40 km/jam, (b). Kecepatan ( <i>Velocity</i> ) pada kec. 60 km/jam, (c). Kecepatan ( <i>Velocity</i> ) pada kec. 100 km/jam.....	52
Gambar 5.11	Grafik <i>Time Response</i> Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Percepatan ( <i>Acceleration</i> ) pada kec. 40 km/jam, (b). Percepatan ( <i>Acceleration</i> ) pada kec. 60 km/jam, (c). Percepatan ( <i>Acceleration</i> ) pada kec. 100 km/jam.....	54
Gambar 5.12	Grafik Nilai RMS Percepatan Bagian Tubuh Pengemudi Untuk Kecepatan yang Bervariasi .....	55
Gambar 5.13	Grafik <i>Time Response</i> Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Perpindahan ( <i>Displacement</i> ) pada kec. 40 km/jam, (b). Perpindahan ( <i>Displacement</i> ) pada kec. 60 km/jam, (c). Perpindahan ( <i>Displacement</i> ) pada kec. 100 km/jam.....	56
Gambar 5.14	Grafik <i>Time Response</i> Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Kecepatan ( <i>Velocity</i> ) pada kec. 40 km/jam, (b). Kecepatan ( <i>Velocity</i> ) pada kec. 60 km/jam, (c). Kecepatan ( <i>Velocity</i> ) pada kec. 100 km/jam.....	58
Gambar 5.15	Grafik <i>Time Response</i> Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Percepatan ( <i>Acceleration</i> ) pada	

	kec. 40 km/jam, (b). Percepatan ( <i>Acceleration</i> ) pada kec. 60 km/jam, (c). Percepatan ( <i>Acceleration</i> ) pada kec. 100 km/jam.....	59
Gamabar 5.16	Grafik Nilai RMS Percepatan Bagian Tubuh Pengemudi Untuk Kecepatan yang Bervariasi .....	60
Gamabar 5.17	Grafik <i>Frequency Response</i> Percepatan Pinggul Pengemudi akibat : (a) Eksitasi Roda Depan, (a) Eksitasi Roda Belakang .....	62
Gamabar 5.18	Grafik <i>Frequency Response</i> Percepatan Perut Pengemudi akibat : (a) Eksitasi Roda Depan, (a) Eksitasi Roda Belakang .....	63
Gamabar 5.19	Grafik <i>Frequency Response</i> Percepatan Dada Pengemudi akibat : (a) Eksitasi Roda Depan, (a) Eksitasi Roda Belakang .....	65
Gamabar 5.20	Grafik <i>Frequency Response</i> Percepatan Kepala Pengemudi akibat : (a) Eksitasi Roda Depan, (a) Eksitasi Roda Belakang .....	66

## DAFTAR SIMBOL



$m_k$	= Massa kepala pengemudi (kg)
$k_k$	= Konstanta kekakuan kepala (N/m)
$c_k$	= Redaman kepala (N.s/m)
$m_d$	= Massa dada (kg)
$k_d$	= Konstanta kekakuan dada (N/m)
$c_d$	= Redaman dada (N.s/m)
$m_e$	= Massa massa perut (kg)
$k_e$	= Konstanta kekakuan perut (N/m)
$c_e$	= Redaman perut (N.s/m)
$m_p$	= Massa pinggul (kg)
$k_p$	= Konstanta kekakuan pinggul (N/m)
$c_p$	= Redaman pinggul (N.s/m)
$m_c$	= Massa chassis (kg)
$m_{bf}$	= Massa ban depan (kg)
$k_{sf}$	= Konstanta kekakuan suspensi depan (N/m)
$c_{sf}$	= Redaman suspensi depan (N.s/m)
$k_{bf}$	= Konstanta kekakuan ban depan (N/m)
$c_{bf}$	= Redaman ban depan (N.s/m)
$m_{br}$	= Massa ban belakang (kg)
$k_{sr}$	= Konstanta kekakuan suspensi belakang (N/m)
$c_{sr}$	= Redaman suspensi belakang (N.s/m)
$k_{br}$	= Konstanta kekakuan ban belakang (N/m)
$c_{br}$	= Redaman ban belakang (N.s/m)
$l_f$	= Jarak ban depan ke <i>center of gravity</i> (m)
$l_r$	= Jarak ban belakang ke <i>center of gravity</i> (m)
$l_m$	= Jarak tubuh manusia ke <i>center of gravity</i> (m)



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Parameter Model Biomechanical dari Boileau dan Rakheja .....	9
Tabel 2.2	Reaksi Kenyamanan Terhadap Percepatan (ISO 2631).....	19
Tabel 2.3	Akibat Frekuensi Maksimum yang Diterima oleh Tubuh Manusia.....	23
Tabel 4.1	Parameter Komponen Kendaraan dan Pengemudi .....	38



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Kendaraan umum merupakan suatu kendaraan yang sering digunakan oleh masyarakat Indonesia yang tidak memiliki kendaraan pribadi untuk pergi ke suatu tempat yang letaknya jauh dan tidak bisa ditempuh dengan berjalan kaki. Kendaraan umum sering juga disebut alat transportasi massal. Kendaraan umum di Indonesia bermacam-macam, ada yang digunakan dalam lingkup antar kecamatan, kabupaten/kota, dan propinsi. Kendaraan umum tersebut seperti angkot, bus, kereta api maupun pesawat. Alat transportasi massal darat yang biasanya digunakan untuk menempuh perjalanan antar kota adalah kereta atau bus. Namun masyarakat umum lebih suka menggunakan bus untuk melakukan perjalanan jauh.

Bus dijadikan pilihan oleh masyarakat umum karena waktunya yang lebih fleksibel dibandingkan dengan kereta api yang harus menyesuaikan dengan jadwal yang sudah ditentukan. Bus dapat mengangkut sekitar 50 sampai 60 penumpang. Bus umumnya melayani trayek antar kota dalam propinsi ataupun luar propinsi. Umumnya supir bus duduk diatas kursi pengendara rata-rata 4 jam dan berhenti setiap kurang lebih 1 jam karena di setiap kota ada terminal pemberhentian. Namun sopir hanya berhenti dalam waktu kurang dari 3 menit. Dengan kondisi jalan yang tidak rata dan cenderung bergelombang disetiap kota menyebabkan supir cepat lelah. Hal ini erat hubungannya dengan kenyamanan selama mengemudi. Kelelahan sopir merupakan salah satu faktor penyebab terjadinya kecelakaan.

Kenyamanan dalam berkendara sudah menjadi tuntutan bagi para pengendaranya. Sejalan dengan tuntutan kenyamanan yang semakin tinggi maka penelitian akan kenyamanan berkendara dewasa ini banyak dilakukan. Kondisi ideal yang ingin diperoleh adalah kemampuan pengendara untuk menahan getaran selama mungkin. Pada umumnya sopir bus banyak yang belum

mengetahui tentang hal ini. Para sopir bus hanya beristirahat ketika berhenti pada tempat yang bisa digunakan untuk menunggu penumpang (bukan di terminal).

Pada tugas akhir ini akan dimodelkan dan disimulasikan dinamika kendaraan umum (bus) dan pengemudinya. Hasil simulasi berupa respon dinamis (perpindahan, kecepatan, percepatan) dari pengemudi bus dianalisa dan ditinjau dari standar kenyamanan.

### **1.2 Perumusan Masalah**

Permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini, yaitu

1. Bagaimana membangun model matematis dari pengendara dan kendaraannya.
2. Bagaimana mensimulasikan repon dinamis (perpindahan, kecepatan, percepatan) dari pengendara transportasi massal (bus).
3. Bagaimana menganalisa hasil simulasi berupa respon dinamis (perpindahan, kecepatan, percepatan) ditinjau dari standar kenyamanan.

### **1.3 Batasan Masalah**

Untuk membatasi ruang lingkup pembahasan, ditetapkan batasan masalah yaitu:

1. Kecepatan bus bernilai konstan untuk pemodelan *time response*.
2. Bus dalam keadaan penuh dengan penumpang.
3. Bodi bus dianggap sebagai balok.
4. Analisa yang dilakukan hanya arah gerak vertikal dan anguler dari bodi.
5. Tempat duduk dianggap berada dalam posisi horizontal.
6. Keadaan jalan dianggap lurus.
7. Drag Force bus diabaikan.
8. Sistem yang dianalisa berjumlah 8 DOF.
9. Massa, redaman, dan kekakuan kursi pengemudi diabaikan, karena terlalu kecil dibandingkan dengan massa *chassis*.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membangun model matematis dari pengendara dan kendaraannya.
2. Mensimulasikan respon dinamis (perpindahan, kecepatan, percepatan) dari pengendara transportasi massal (bus).
3. Menganalisa hasil simulasi berupa respon dinamis (perpindahan, kecepatan, percepatan) ditinjau dari standar kenyamanan.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penulisan Tugas Akhir ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai respon yang terjadi pada bus dan pengemudinya pada saat berada pada profil jalan tertentu.
2. Memberikan data berupa tingkat getaran yang diterima tubuh manusia pada saat berkendara di profil jalan tertentu.
3. Memberikan informasi kepada pengemudi bus mengenai tingkat ketahanan tubuh terhadap getaran akibat profil jalan tertentu berdasarkan ISO 2631 sehingga menjadikan hal ini salah satu pertimbangan dalam mengemudi bus.

#### **1.6 Sistematika Penulisan Laporan**

Laporan penelitian Tugas Akhir ini akan disusun secara sistematis dibagi dalam beberapa bab, dengan perincian sebagai berikut :

##### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Bab ini berisikan penjelasan latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, manfaat penelitian dan sistematika penulisan laporan.

##### **BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini berisikan teori-teori dan fakta-fakta yang dipakai sebagai dasar untuk melakukan rujukan dan

pembahasan permasalahan yang diangkat pada tugas akhir ini.

### **BAB 3 METODOLOGI**

Berisi uraian-uraian urutan proses pengerjaan tugas akhir ini yang meliputi: pemodelan matematis, simulasi menggunakan Simulink Matlab.

### **BAB 4 PEMODELAN SISTEM**

Pada bab ini dilakukan pemodelan matematis dan pemodelan pada Simulink menggunakan pemodelan *quarter car*.

### **BAB 5 ANALISIS HASIL**

Pada bab ini akan dilakukan pemaparan hasil dari simulasi dari input step dan sinusoidal.

### **BAB 6 PENUTUP**

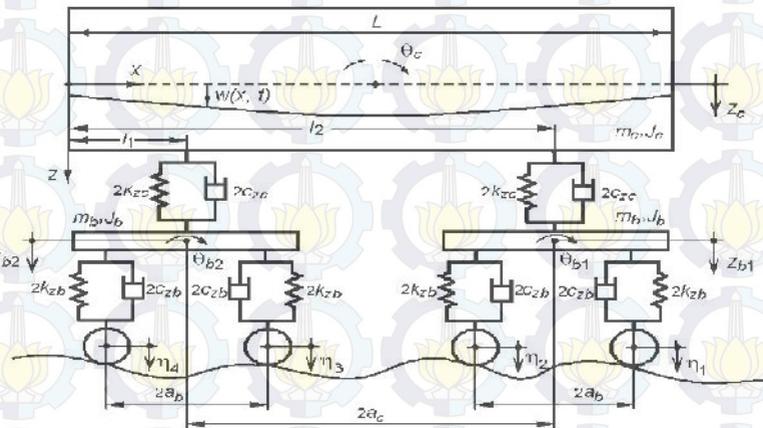
Bab ini berisikan kesimpulan penelitian ini dan saran untuk penelitian selanjutnya.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka yang digunakan sebagai referensi dalam penulisan Tugas Akhir ini berupa penelitian terdahulu yang pernah dilakukan dalam menganalisa respon dinamis kendaraan yang bertujuan untuk menganalisa kenyamanan kendaraan angkut massal. Beberapa penelitian terdahulu dijelaskan pada paragraf di bawah ini.

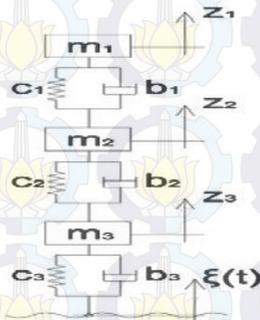
Penelitian pertama mengenai kenyamanan berkendara yaitu dilakukan oleh M d lina Dumitriu pada tahun 2012 mengenai kenyamanan penumpang kereta api. Penelitian ini mengenai efek perubahan kecepatan terhadap kenyamanan yang diterima oleh penumpang. Pemodelan kereta api dijelaskan pada gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1 Pemodelan Kereta Api

Kecepatan variasi pada penelitian ini yaitu 180 dan 240 km/jam. Dari kecepatan variasi ini didapatkan koefisien redaman. Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu Untuk mengurangi getaran yang terjadi pada kendaraan maka perlu modifikasi nilai redaman. Tetapi antara depan dan belakang pengurangannya berbeda. Hal ini akan mempengaruhi kenyamanan berkendara.

Pada tahun 2011 Dragan Sekuli dan Vlastimir Dedovi melakukan penelitian mengenai efek dari kekakuan dan redaman dari elemen suspensi sistem untuk optimalisasi perilaku getaran yang terjadi pada bus. Penelitian ini menganalisa mengenai efek dari kekakuan pegas dan redaman shock absorber pada percepatan vertikal dari tubuh pengemudi. Penelitian ini dilakukan dengan pemodelan seperempat kendaraan diperlihatkan pada gambar 2.2.



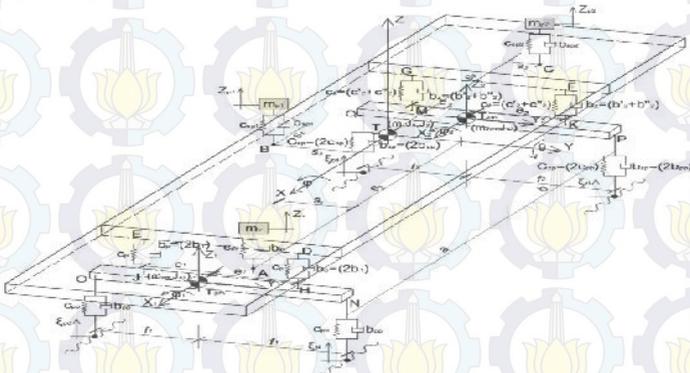
Gambar 2.2 Pemodelan Seperempat Bus dan Pengendaranya

Pada gambar di atas  $m_1$  merupakan massa pengemudi dan kursi,  $m_2$  merupakan massa pegas depan tertekan, dan  $m_3$  merupakan massa pegas depan tidak tertekan. Model di atas kemudian dibuat persamaan geraknya kemudian disimulasikan di Matlab. Dari hasil simulasi Matlab didapatkan getaran yang didapatkan oleh supir yang diakibatkan perbedaan kontur jalan. Kemudian getaran yang didapatkan ini dianalisa kenyamanannya. Analisa kenyamanan menggunakan ISO 2631.

Dragan Sekulic', Vlastimir Dedovic, Srdjan Rusov a, Slaviša Šalinic, dan Aleksandar Obradovic pada tahun 2013 melakukan penelitian mengenai kenyamanan berkendara pada pengemudi dan penumpang bus yang ditinjau dengan menggunakan standar ISO 2631. Inputnya yaitu pada kontur jalan aspal yang kasar, gambar 2.3 merupakan bus IK-301 dan gambar 2.4 merupakan pemodelan dari bus yang dianalisa.



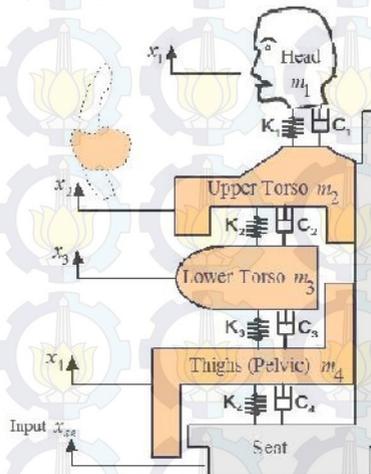
Gambar 2.3 Bus IK-301



Gambar 2.4 Pemodelan Bus IK-301

Dari gambar 2.4 dianalisa dan didapatkan persamaan gerak dari sistem yang akan dimasukkan ke Matlab. Dari Matlab didapatkan mengenai kenyamanan yang dialami pengemudi dan penumpang pada saat berjalan pada profil jalan aspal kasar.

Pada tahun 2012 Mostafa dan Abbas melakukan penelitian mengenai pemodelan bentuk tubuh manusia. Pemodelan tubuh manusia diperlihatkan pada gambar 2.5. Referensi yang digunakan Mustofa dan Abbas yaitu penelitian yang dilakukan oleh Boileau and Rakheja.



Gamabar 2.5 Pemodelan Manusia

Pemodelan terdiri dari empat massa yang dihubungkan oleh empat pasang pegas dan redaman. Empat massa tersebut mempresentasikan empat bagian tubuh berurutan yaitu massa kepala ( $m_1$ ), massa dada dan *upper torso* ( $m_2$ ), massa *lower torso* ( $m_3$ ), dan massa paha dan pinggang yang berada di tempat duduk kendaraan ( $m_4$ ). Massa dari kaki bagian bawah diabaikan pengaruhnya terhadap *biodynamics response* dari *seated body*. Sedangkan kekakuan dan *damping properties* dari paha ( $k_4$ ) dan

( $c_4$ ), *lower torso* ( $k_3$ ) dan ( $c_3$ ), *upper torso* ( $k_2$ ) dan ( $c_2$ ), serta kepala ( $k_1$ ) dan ( $c_1$ ).

Berdasarkan data *anthropometric* Boileau proporsi dari berat tubuh manusia adalah 7.5% untuk kepala, 40.2% untuk dada dan *upper torso*, 12.2% untuk *lower torso*, dan 18.2% untuk paha dan kaki bagian atas. Untuk seseorang yang sedang duduk, berat badan yang ditumpu oleh *seat* adalah sebesar 78%. Dan untuk nilai kekauan dan redaman dari tubuh manusia dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.1 Parameter model Biomechanical dari Boileau dan Rakheja

Stiffness Coefficient (N/m)	Damping coefficient (N.s/m)
$k_1 = 310000$	$c_1 = 400$
$k_2 = 183000$	$c_2 = 4750$
$k_3 = 162800$	$c_3 = 4585$
$k_4 = 90000$	$c_4 = 2064$

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Pengenalan Sistem Getaran

Parameter dari gerak adalah adanya perpindahan, kecepatan dan gaya yang menyebabkannya merupakan hal yang menarik keingintahuan manusia untuk dikaji lebih dalam sebagai pengembangan ilmu pengetahuan. Hal terpenting dari teknik rekayasa modern dewasa ini adalah analisa dan prediksi dari perilaku dinamik suatu sistem fisik. Adanya perilaku dinamik ini ditunjukkan oleh gerakam vibrasi dari suatu system fisik. Getaran dapat diartikan sebagai gerak (respon) periodik atau osilatif terhadap titik keseimbangan dari suatu sistem dinamis. Proses analisa sistem getaran dapat dilihat pada skema berikut ini:



Gambar 2.6 Skema Analisa Sistem Getaran

Dari skema pada gambar 2.6 dapat dijelaskan bahwa untuk mendapatkan respon dalam suatu analisa system dinamis diperlukan adanya gaya eksitasi (*Initial condition*) sebagai input. Sistem fisik sendiri sangatlah kompleks untuk dianalisa, selain itu diperlukan kemampuan untuk memprediksi perilaku dari system. Hal tersebut menjadi *problem engineering* selama ini, sehingga dikembangkan model idealisasi dengan asumsi yang memenuhi syarat dalam menggambarkan system riilnya yang biasa disebut model analisa. Model analisa dibagi menjadi dua diantaranya:

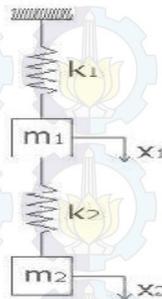
1. Sistem dengan parameter *discrete* atau *lumped system* dan
2. Sistem dengan parameter terdistribusi atau *continuous system*.

Model analisa ini merupakan kebutuhan utama dalam menyelesaikan suatu *problem engineering* karena dari model analisa ini akan diturunkan persamaan matematika sebagai prediksi system bersangkutan. Untuk model analisa diskrit menggunakan model matematik sistem persamaan diferensial ordiner (biasa), sedangkan untuk model analisa kontinyu menggunakan model matematik system persamaan deferensial parsial.

### 2.2.2 Getaran Sistem Multi-DOF

Sistem multi derajat kebebasan adalah sistem yang membutuhkan dua buah atau lebih koordinat bebas untuk menentukan kedudukannya. Dalam melakukan analisa pada sistem multi derajat kebebasan, perlu dipahami terlebih dahulu analisa pada sistem yang memiliki dua derajat kebebasan karena

sebenarnya konsep yang digunakan sama. Dalam sistem massa pegas seperti terlihat pada Gambar 2.7, bila gerakan massa  $m_1$  dan  $m_2$  secara vertikal dibatasi paling sedikit dibutuhkan satu koordinat  $x(t)$  untuk menentukan kedudukan massa pada berbagai waktu. Berarti sistem membutuhkan dua buah koordinat bersama-sama untuk menentukan kedudukan massa yaitu kedudukan massa satu pada waktu tertentu ( $x_1$ ) dan kedudukan massa dua pada waktu tertentu ( $x_2$ ). Sistem yang seperti ini dinamakan sistem dua-derajat-kebebasan.



Gambar 2.7 Sistem Pegas 2 DOF

Penyelesaian sebuah permasalahan mengenai sistem multi derajat kebebasan dapat dilakukan dengan cara seperti dibawah ini:

1. Mengatur koordinat untuk mendeskripsikan posisi dari berbagai massa dan *rigid body* yang ada pada sistem.
2. Menentukan konfigurasi kesetimbangan statis dari sistem.
3. Menggambar *free body diagram* dari setiap massa pada sistem sehingga gaya-gaya yang bekerja pada massa tersebut dapat terlihat setelah massa diberi perpindahan dan kecepatan.
4. Menggunakan hukum II Newton untuk setiap *free body diagram* yaitu  $m_i \ddot{x}_i = \sum_j F_{ij}$  untuk massa  $i$  (2.1)

atau

$$J_i \ddot{\theta}_i = \sum_j M_{ij} \quad (2.2)$$

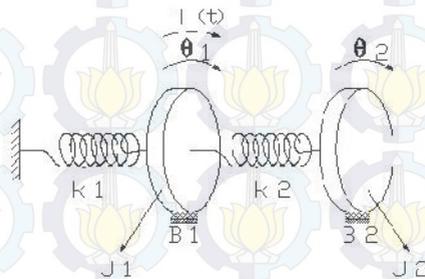
Dimana  $\sum_j F_{ij}$  merupakan jumlah dari seluruh gaya yang bekerja pada massa  $m_i$ , sedangkan  $M_{ij}$  merupakan jumlah dari momen dari semua gaya yang bekerja pada *rigid body* pada massa inersia  $J_i$ .

5. Menggunakan persamaan Lagrange untuk menurunkan persamaan gerak yang telah didapat. Persamaan Lagrange untuk  $n$  derajat kebebasan adalah sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial V}{\partial q_j} = Q_j^{(n)}, j = 1, 2, \dots, n \quad (2.3)$$

Dimana  $\dot{q}_j = \partial q_j / \partial t$  adalah kecepatan dan  $Q_j^{(n)}$  adalah gaya non konservatif. Untuk gaya konservatif maka nilai  $Q_j^{(n)} = 0$ . Sedangkan  $T$  adalah energi kinetik dan  $V$  adalah energi potensial.

6. Selain dengan persamaan Lagrange, persamaan gerak dapat diselesaikan dengan bantuan simulink Matlab dengan menggunakan metode *state space*. Metode *state space* akan dijelaskan pada sub bab berikutnya.



Gambar 2.8 Sistem Pegas 2 DOF dengan Gaya Rotasi

### 2.2.3. Motion of Base

Suatu waktu sistem pegas-massa-peredam mengalami gerak harmonik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9 (a). Eksitasi input  $y(t)$  menyatakan perpindahan dari *base*, dan  $x(t)$  menyatakan perpindahan massa dari posisi kesetimbangan statis pada waktu  $t$ . Maka perpanjangan dari pegas adalah  $(x-y)$  dan kecepatan relatif antara kedua ujung damper adalah  $(\dot{x} - \dot{y})$ . Dari *free body diagram* yang ditunjukkan pada gambar 2.12(b), didapatkan persamaan gerak:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.4)$$

Jika  $y(t) = Y \sin \omega t$ , persamaan (2.23) menjadi:

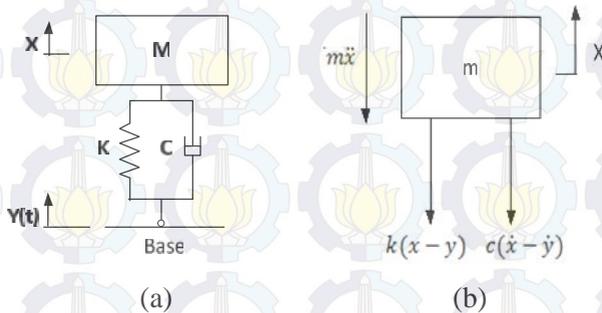
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = ky + c\dot{y} = kY \sin \omega t + c\omega Y \cos \omega t = A \sin(\omega t - \alpha) \quad (2.5)$$

Dimana  $A = Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}$  dan  $\alpha = \tan^{-1} \left[ -\frac{c\omega}{k} \right]$ .

Ini menunjukkan bahwa pemberian eksitasi ke *base* setara dengan memberikan gaya harmonik sebesar  $A$  ke massa. Sehingga respon steady state dari massa,  $x_p(t)$ , dapat dinyatakan sebagai:

$$x_p(t) = \frac{Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{[(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2]^{1/2}} \sin(\omega t - \phi_1 - \alpha) \quad (2.6)$$

dimana  $\phi_1 = \tan^{-1} \left[ \frac{c\omega}{k - m\omega^2} \right]$



Gambar 2.9 Base Excitation

Menggunakan identitas trigonometri, persamaan (2.6) dapat ditulis secara lebih mudah sebagai:

$$x_p(t) = X \sin(\omega t - \phi) \quad (2.7)$$

dimana  $X$  dan  $\phi$  ditentukan oleh:

$$\frac{X}{Y} = \left[ \frac{k^2 + (c\omega)^2}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

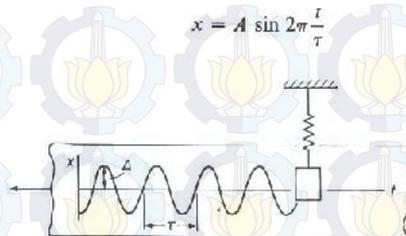
dan

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{m c \omega^3}{k(k - m\omega^2) + (c\omega)^2} \right] \quad (2.9)$$

#### 2.2.4. Gerak Harmonik

Gerak harmonik merupakan gerak yang paling sederhana dari gerak periodik. Gerak periodik adalah gerak gelombang yang berulang-ulang dalam selang waktu yang sama. Waktu yang digunakan untuk melakukan gerak periodik disebut dengan periode ( $\tau$ ). Frekuensi merupakan banyaknya getaran yang dilakukan dalam 1 detik. Frekuensi dapat dirumuskan  $f = 1/\tau$ .

Gerak harmonik dapat diperagakan melalui gambar dibawah ini. Jika massa yang melekat pada pegas ditarik dari keadaan diamnya dan kemudian dilepaskan, maka massa tersebut akan melakukan gerak bolak-balik melalui garis keadaan diamnya. Dengan menempatkan suatu sumber cahaya pada massa yang berosilasi, maka gerakanya dapat direkam pada suatu keping film peka cahaya yang bergerak pada kecepatan konstan.



Gambar 2.10 Rekaman Gerak Harmonik

Gerakan yang terekam pada film dapat dinyatakan dalam persamaan  $x = A \sin\left(2\pi \frac{t}{\tau}\right)$  dengan A adalah amplitude atau simpangan terbesar diukur pada posisi setimbang, dan  $\tau$  adalah periode. Gerak diulang pada  $t = \tau$ .

Gerak harmonik sering dinyatakan sebagai proyeksi suatu titik yang bergerak pada melingkar dengan kecepatan konstan terhadap suatu garis lurus seperti diunjukkan pada gambar 2.10. Dengan kecepatan sudut sebesar  $\omega$ , perpindahan simpangan x dapat dituliskan sebagai berikut :

$$x = A \sin(\omega t)$$

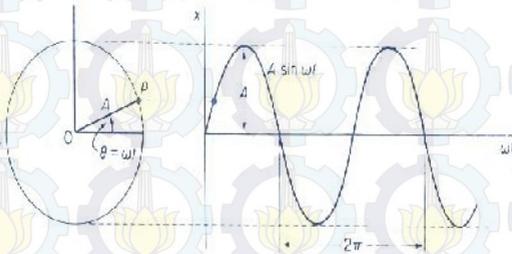
Besaran  $\omega$  diukur dalam radian per detik dan disebut frekuensi sudut. Karena gerakannya berulang sebesar  $2\pi$  radian, maka didapat hubungan :

$$\omega = 2\pi f$$

Kecepatan dan percepatan gerak harmonik dapat diperoleh secara mudah dengan menurunkan persamaan diatas sehingga didapatkan persamaan :

$$\dot{x} = A\omega \cos(\omega t) = A\omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

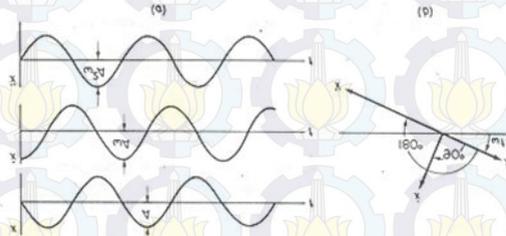
$$\ddot{x} = -A\omega^2 \sin(\omega t) = A\omega^2 \sin(\omega t + \pi)$$



Gambar 2.11 Proyeksi Gerak Harmonik Pada Lingkaran

Hubungan dari percepatan, kecepatan, dan simpangan dapat dijelaskan pada gambar dibawah ini. Jika simpangan bernilai maksimum ataupun minimum, maka kecepatan akan bernilai nol.

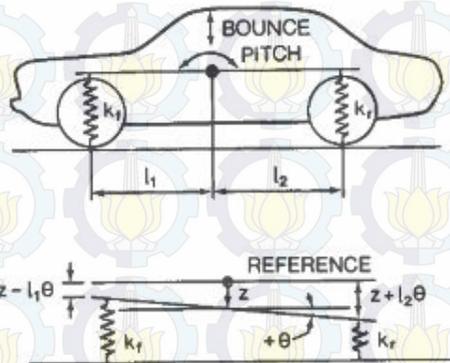
Jika simpangan bernilai nol, maka nilai kecepatan akan maksimum ataupun minimum. Jika simpangan bernilai maksimum, maka nilai percepatannya minimum dan sebaliknya jika nilai simpangan bernilai minimum, maka percepatannya bernilai maksimum.



Gambar 2.12 Hubungan Simpangan, Kecepatan, dan Percepatan

### 2.2.5 Pitching dan Bouncing pada Setengah Kendaraan

Pada saat melaju pada kecepatan tertentu kendaraan mengalami suatu kendaraan yang disebut *pitching* dan *bouncing*. Pada gambar 2.13 akan ditunjukkan mengenai mekanisme gerak *pitching* dan *bouncing*.



Gambar 2.13 Mekanisme Pitching dan Bouncing

Persamaan dgrak untuk model matematis pada gambar 2.13 adalah sebagai berikut:

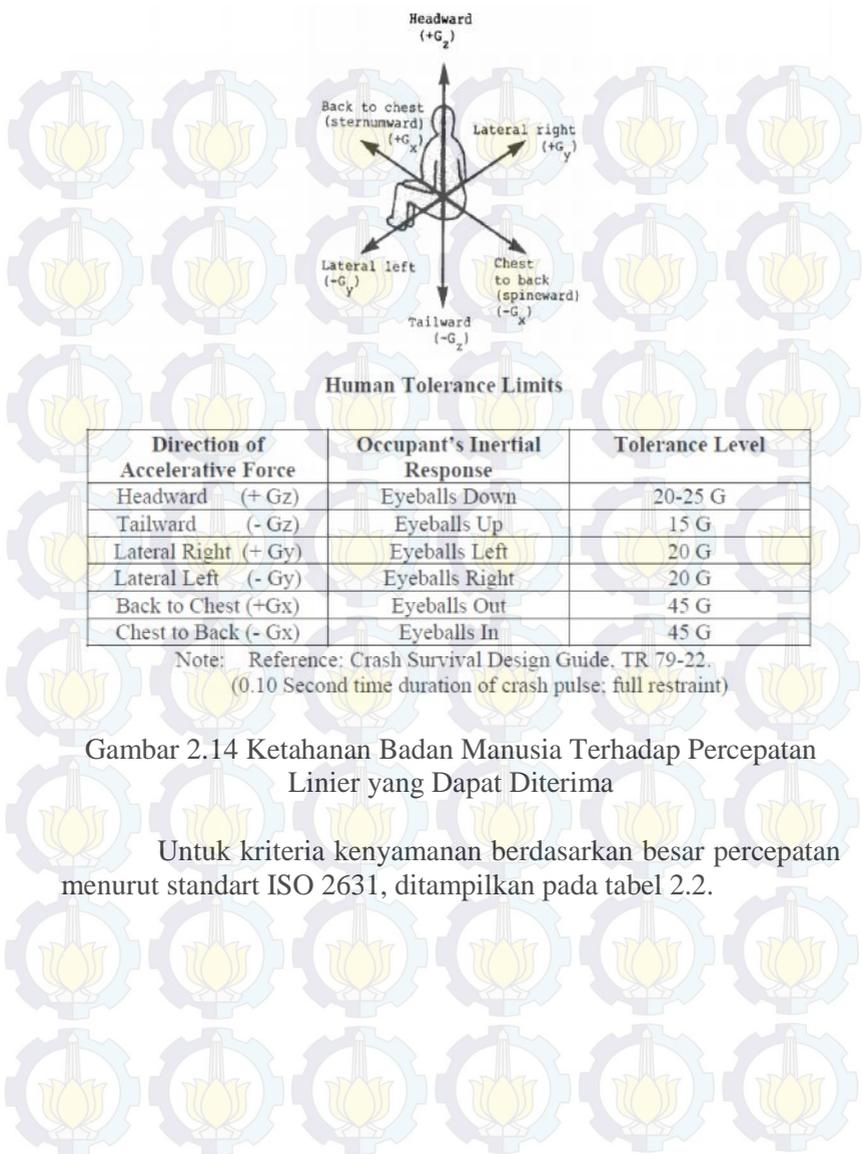
$$m\ddot{z} + k_f(z - l_1\theta) + k_r(z + l_2\theta) = 0 \quad (2.10)$$

$$I\ddot{\theta} - k_f l_1(z - l_1\theta) + k_r l_2(z + l_2\theta) = 0 \quad (2.11)$$

### 2.2.6 Kriteria Kenyamanan bagi Penumpang Kendaraan

Gerakan utama yang dialami pengemudi selama mengemudi adalah berupa percepatan atau perlambatan dan getaran. Unit dasar yang digunakan sebagai ukuran dari percepatan yang dialami manusia adalah berbasis pada gaya gravitasi yang diringkas G. Seseorang yang jatuh bebas dimana percepatan jatuhnya adalah  $9,81 \text{ m/s}^2$  dikatakan mengalami percepatan sebesar 1 G. Toleransi manusia terhadap percepatan ditunjukkan pada gambar 2.14. Gambar tersebut menunjukkan level percepatan rata-rata untuk bermacam arah gerakan yang mampu ditahan oleh tubuh manusia.

Informasi ketahanan badan manusia terhadap percepatan merupakan hal yang sangat penting sebagai referensi dalam perancangan ketahanan bodi kendaraan terhadap *impact*. Jika pada saat kendaraan mengalami *impact* dimana pengemudi atau penumpang mendapat percepatan atau perlambatan melebihi yang mampu didukung oleh badan, maka akan dapat membahayakan pengemudi dan penumpang kendaraan tersebut.



Gambar 2.14 Ketahanan Badan Manusia Terhadap Percepatan Linier yang Dapat Diterima

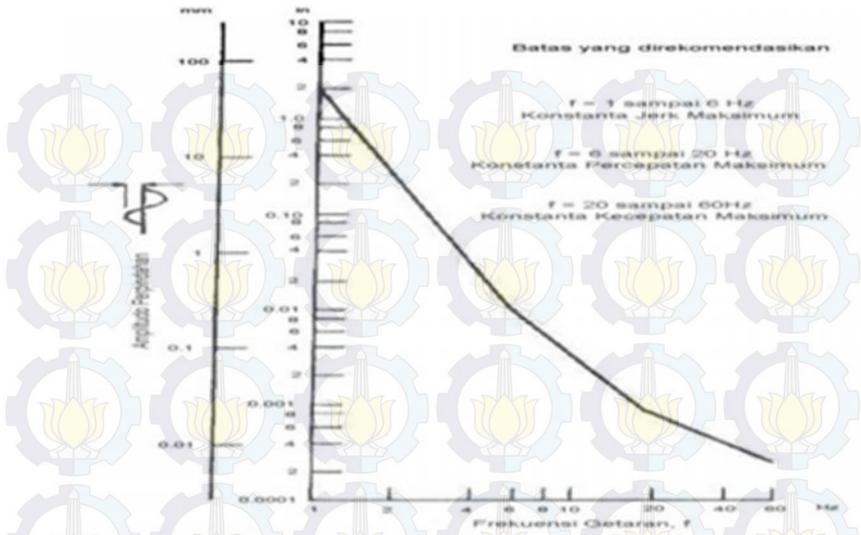
Untuk kriteria kenyamanan berdasarkan besar percepatan menurut standart ISO 2631, ditampilkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Reaksi kenyamanan terhadap percepatan – ISO 2631

No.	Getaran	Keterangan
1	$> 0,315 \text{ m/s}^2$	Tidak ada keluhan
2	$0,315 - 0,63 \text{ m/s}^2$	Sedikit tidak nyaman
3	$0,5 - 1 \text{ m/s}^2$	Agak tidak nyaman
4	$0,8 - 1,6 \text{ m/s}^2$	Tidak nyaman
5	$1,25 - 2,5 \text{ m/s}^2$	Sangat tidak nyaman
6	$> 2 \text{ m/s}^2$	Amat sangat tidak nyaman

Secara umum kriteria kenyamanan atau batasan ukuran kenyamanan bagi pengendara sangat sulit untuk ditentukan karena banyak terkait dengan hal-hal subjektif. Banyak studi yang telah dilakukan oleh para peneliti untuk mencoba menentukan batas-batas kenyamanan dari penumpang kendaraan.

Salah satu kriteria kenyamanan bagi penumpang kendaraan yang terkena getaran vertikal adalah kriteria Janeway. Kriteria Janeway ini digunakan sebagai kriteria kenyamanan oleh Society of Automotive Engineering (SAE) yang diwujudkan dalam manual yaitu Ride and Vibration Data Manual J6a of SAE. Kriteria kenyamanan Janeway tersebut pada intinya memberikan batasan toleransi amplitudo getaran sebagai fungsi dari frekuensi yang ditunjukkan pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Batas Getaran Vertikal yang Dijanjikan oleh Janeway

Batas toleransi kenyamanan ditetapkan untuk 3 level frekuensi, yaitu : pertama, pada frekuensi 1 sampai 6 Hz, kedua pada frekuensi 6 sampai 20 Hz, dan ketiga pada 20 sampai 60 Hz. Untuk frekuensi getaran 1 - 6 Hz, harga maksimum dari Jerk yaitu perubahan percepatan getaran per satuan waktu tidak boleh melebihi 12,6 m/dt<sup>3</sup> (496 in/dt<sup>3</sup>). Getaran dianggap harmonis misal :  $x(t) = A \sin(\omega t)$ , harga Jerk adalah:

$$\frac{dx^3}{dt^3} = A\omega^3 \cos \omega t$$

Jadi harga maksimum dari Jerk adalah:  $A\omega^3$ . Dengan demikian untuk getaran dengan toleransi 1 – 6 Hz maka amplitudo maksimum yang diijinkan adalah:

$$A = \frac{12,6}{\omega^3} \text{ (meter)}$$

Misal untuk frekuensi 1 Hz =  $2\pi \text{ rad/dt}$ , maka amplitudo maksimum yang diijinkan adalah:

$$A = \frac{12,6 \text{ m/dt}^3}{(2\pi \text{ rad/dt})^3} = 0,0508 \text{ m} = 2 \text{ in}$$

Untuk frekuensi getaran 6 sampai 20 Hz, harga maksimum percepatan yang diijinkan sebagai batas kenyamanan adalah  $0,33 \text{ m/dt}^2$  ( $13 \text{ in/dt}^2$ ). Dengan menganggap getaran harmonis seperti diatas maka besar percepatan adalah:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2 \sin \omega t$$

Amplitudo dari percepatan atau percepatan maksimum adalah  $A\omega^2$ , dengan demikian amplitudo getaran maksimum yang diijinkan pada frekuensi 6 – 20 Hz adalah :

$$A = \frac{0,33 \text{ m/dt}^2}{\omega^2 (\text{rad/dt})^2}$$

Dan untuk frekuensi getaran 20 sampai 60 Hz, harga maksimum kecepatan yang diijinkan untuk kenyamanan adalah  $2,7 \text{ mm/dt}$  ( $0,105 \text{ in/dt}$ ). Pada getaran harmonis seperti di atas maka harga kecepatan dirumuskan :

$$\frac{dx}{dt} = A\omega \cos \omega t$$

Dan kecepatan maksimum adalah sebesar  $A\omega$ . Dengan demikian harga amplitudo getaran maksimum yang diijinkan untuk frekuensi 20 – 60 Hz adalah :

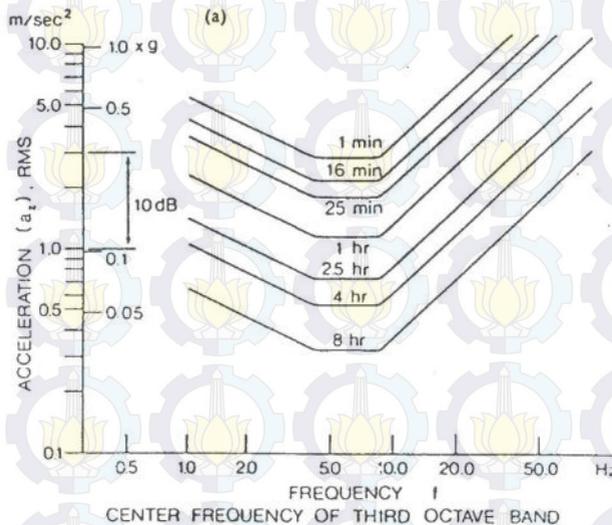
$$A = \frac{2,7 \text{ m/dt}}{\omega \text{ rad/dt}}$$

Selain kriteria Janeway di atas, juga telah dikembangkan suatu standar tentang kriteria getaran untuk tubuh manusia yang dapat ditoleransi. Standar ini telah dipakai dan sesuai dengan standar internasional ISO 2631, 1974. Standar tersebut berlaku untuk kendaraan transportasi dan juga untuk kendaraan di industri. Tiga batasan didefinisikan pada standar ini untuk frekuensi antara 1 sampai 80 Hz yaitu :

- a. Batasan waktu bagi tubuh manusia tahan dan aman terhadap kesehatan akibat getaran. Batasan ini tidak boleh dilewati tanpa ada alasan dan justifikasi khusus.

- b. Batasan kelelahan atau penurunan kinerja yang mana terkait dengan kemampuan untuk mempertahankan efisiensi kerja berlaku untuk pekerjaan mengemudikan kendaraan jalan raya atau traktor.
- c. Batasan penurunan kenyamanan yang mana terkait dengan mempertahankan kondisi nyaman penumpang untuk tidak terganggu jika membaca, menulis, dan makan di kendaraan.

Bagi kegiatan mengemudi yang penting diperhatikan adalah batasan yang menunjukkan turunnya efisiensi kerja yang diijinkan agar tetap dapat menjamin keamanan transportasi. Untuk itu batasan yang perlu diperhatikan adalah batasan (b) diatas. Batasan yang menunjukkan kelelahan atau menurunnya efisiensi kerja pengemudi akibat getaran vertikal kendaraan dapat dilihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Batasan Kelelahan Akibat Penurunan Kinerja Pengemudi Akibat Getaran Vertikal

Dalam gambar tersebut ditunjukkan batas waktu maksimum yang diijinkan agar kelelahan pengemudi tidak membahayakan jika ia menerima getaran vertikal dengan percepatan dan frekuensi tertentu, makin rendah percepatan getaran maka makin panjang waktu tubuh manusia tahan terhadap getaran tersebut. Percepatan getaran yang dimaksud dalam gambar 2.18 adalah berupa akar rata-rata kuadrat (rms) dan percepatan. Pada gambar 2.19 akan diketahui frekuensi maksimum yang diterima oleh tubuh manusia. Pada tabel 2.2 dijelaskan mengenai akibat dari frekuensi maksimum yang diterima oleh tubuh manusia.

Tabel 2.3 Akibat Frekuensi Maksimum yang Diterima oleh Tubuh Manusia

<b>Table 1: Frequency of vibration and its affects on the human body</b>	
<b>Frequency of vibration</b>	<b>Types of effect</b>
Below 1 Hz	Motion sickness
3.5 to 6 Hz	Alerting effect
4 to 10 Hz	Chest and abdomen pain
Around 5 Hz	Degrades manual actions
7 to 20 Hz	Communication Problems
8 to 10 Hz	Back ache
10 to 20 Hz	Intestine and Bladder pain
10 to 30 Hz	Degrades manual and visual controls
10 to 90 Hz	Degrades visual actions

### 2.2.7 State Variabel

State variable merupakan karakteristik dinamis yang bervariasi dari sistem / model yang memiliki massa / volume pada waktu yang berbeda-beda dari segi jumlah dalam sistem / model. Dalam menyelesaikan multi derajat kebebasan (multi DOF), diperlukan state variabel, input dan output dari persamaan yang akan diselesaikan. Langkah yang digunakan adalah dengan merubah diffrensial orde 2 ke dalam differensial orde 1. Hubungan

matematis antara orde 2 dan orde 1 dapat dilihat pada persamaan di bawah ini.

$$\dot{x} = v \quad \ddot{x} = \dot{v} \quad \dot{\theta} = \omega \quad \ddot{\theta} = \dot{\omega}$$

Perubahan differensial orde 2 ke orde 1 pada gerak translasi

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad \rightarrow \quad m\dot{v} + cv + kx = F(t)$$

$$\dot{v} = \frac{1}{m}[F(t) - cv - kx] \quad (2.12)$$

Persamaan gerak yang telah dirubah ke dalam orde 1 kemudian ditulis dalam bentuk matrik.

$$\{\dot{q}\} = [A]\{q\} + [B]\{u\}$$

Untuk persamaan gerak translasi, matrix yang terbentuk adalah sebagai berikut:

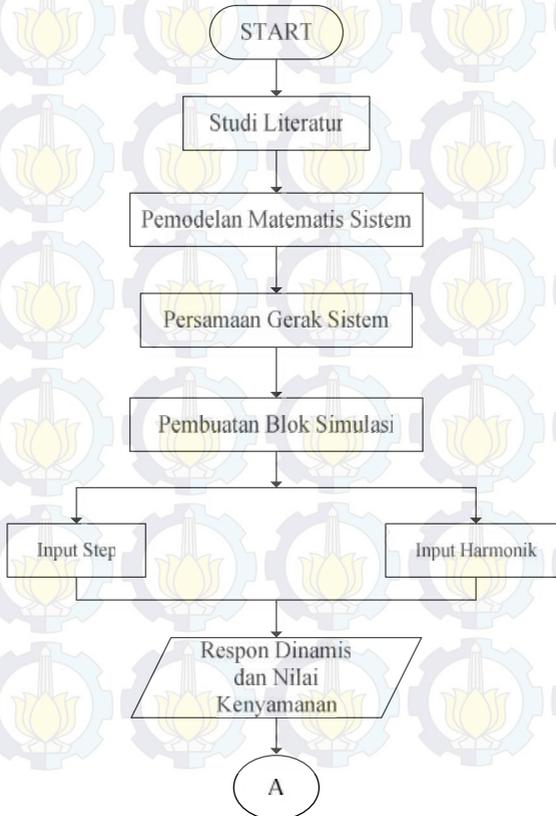
$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \{F(t)\}$$

Persamaan *state variable* yang telah terbentuk kemudian dituliskan pada blok diagram Simulink.

## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Metode Analisis

Penulisan tugas akhir dilakukan untuk mengetahui respon gerak dinamis (perpindahan, kecepatan, percepatan) dari pengendara transportasi massal (bus) dan hasil simulasi berupa respon dinamis (perpindahan, kecepatan, percepatan) ditinjau dari standar kenyamanan. Dalam menganalisis dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Pemodelan Pengendara Transportasi Massal (Bus)

Metode pelaksanaan tugas akhir ini secara umum ditunjukkan pada Gambar 3.1, dimulai dari studi literatur. Dilanjutkan dengan pemodelan matematis, dibuat diagram blok pada MATLAB Simulink berdasarkan persamaan gerak sistem untuk mengetahui respon sistem pada saat diberi input gaya berupa impulsif dan harmonik. Terakhir, mengambil kesimpulan berdasarkan analisis data hasil respon dinamika sistem dan didapatkan nilai kenyamanan.

### 3.2 Tahap Studi Literatur

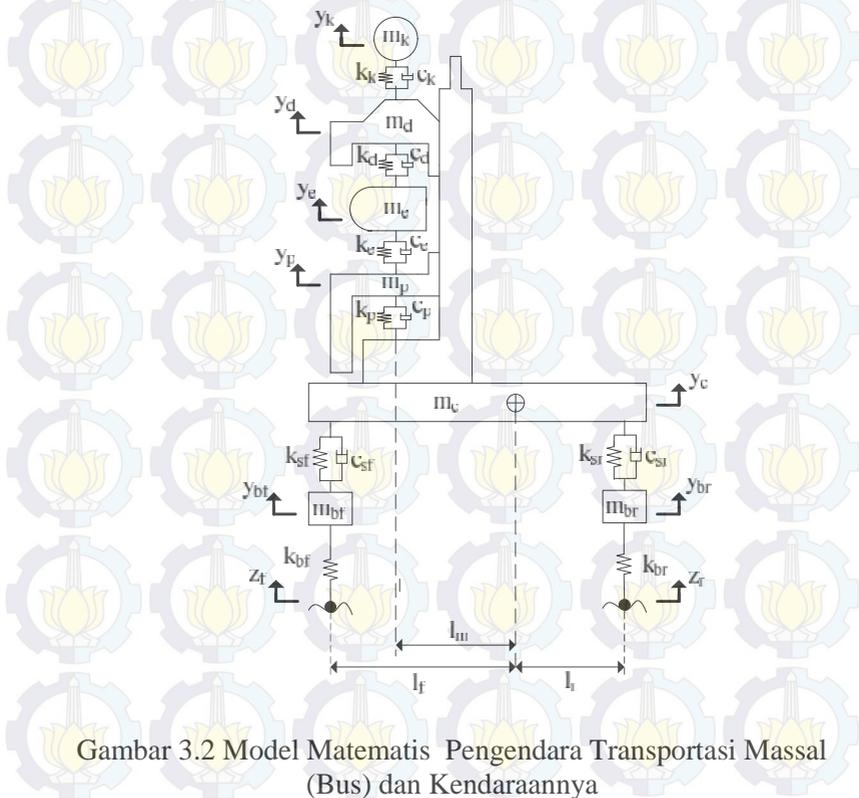
Dalam penulisan Tugas Akhir ini diperlukan referensi-referensi yang dapat menunjang dalam menganalisis Pemodelan pengendara transportasi massal (bus) yang dijadikan sebagai permasalahan. Oleh karena itu, dilakukan studi literatur untuk menambah wawasan pengetahuan, landasan mengenai permasalahan yang akan dibahas.

Adapun materi dari studi literatur yang mendukung dalam penulisan Tugas Akhir ini yaitu mekanika getaran dasar, getaran pada suspensi kendaraan, permodelan sistem dinamis, sistem mekanis getaran translasi dan rotasi, serta blok simulasi pada program Simulink Matlab. Referensi untuk studi literatur didapat

dari buku, jurnal-jurnal ilmiah, maupun penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan.

### 3.3 Tahap Pemodelan Matematis Sistem

Dalam tugas akhir ini akan dianalisis respon gerak dari pengendara transportasi massal (bus) dengan input eksitasi jalan berupa transien (step) dan *steady state* (harmonik). Dari respon gerak yang terjadi dapat ditentukan besar percepatan akibat eksitasi jalan, selain itu dapat dibandingkan hasilnya dengan kriteria kenyamanan yang ada.

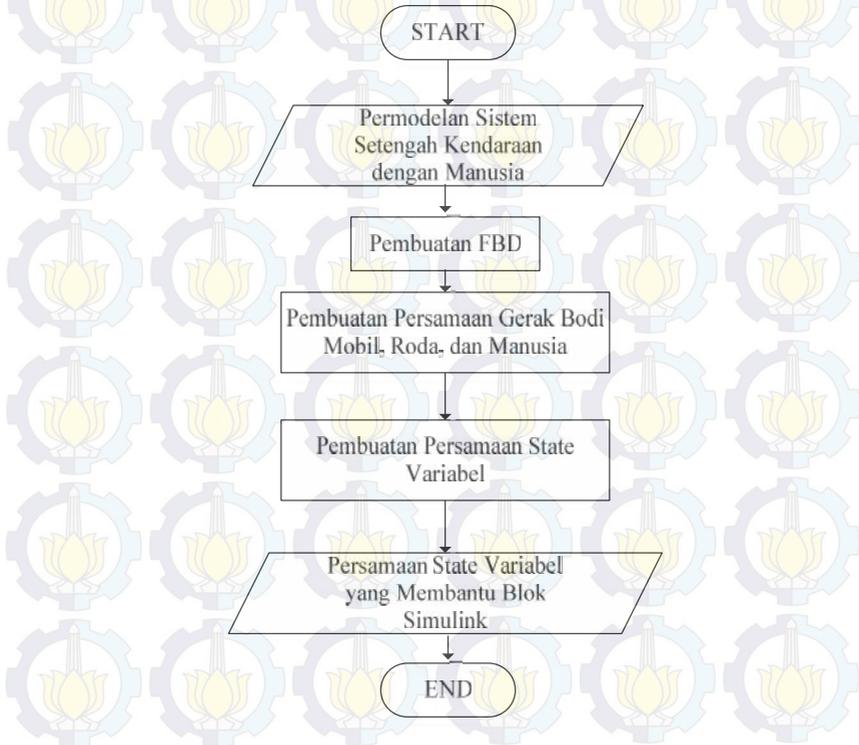


Gambar 3.2 Model Matematis Pengendara Transportasi Massal (Bus) dan Kendaraannya

Pemodelan matematis yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah pemodelan setengah kendaraan (*half car model*) dengan delapan derajat kebebasan (8 DOF) dengan pemodelan menggunakan kendaraan dan manusia yang dijelaskan pada gambar 3.2. Pemodelannya meliputi  $m_k$  (massa kepala),  $m_d$  (massa dada),  $m_e$  (massa perut),  $m_p$  (massa pinggul),  $m_c$  (massa chasis),  $m_{bf}$  (massa ban depan), dan  $m_{br}$  (massa ban belakang).

### 3.4 Tahap Pembuatan Persamaan Gerak Sistem

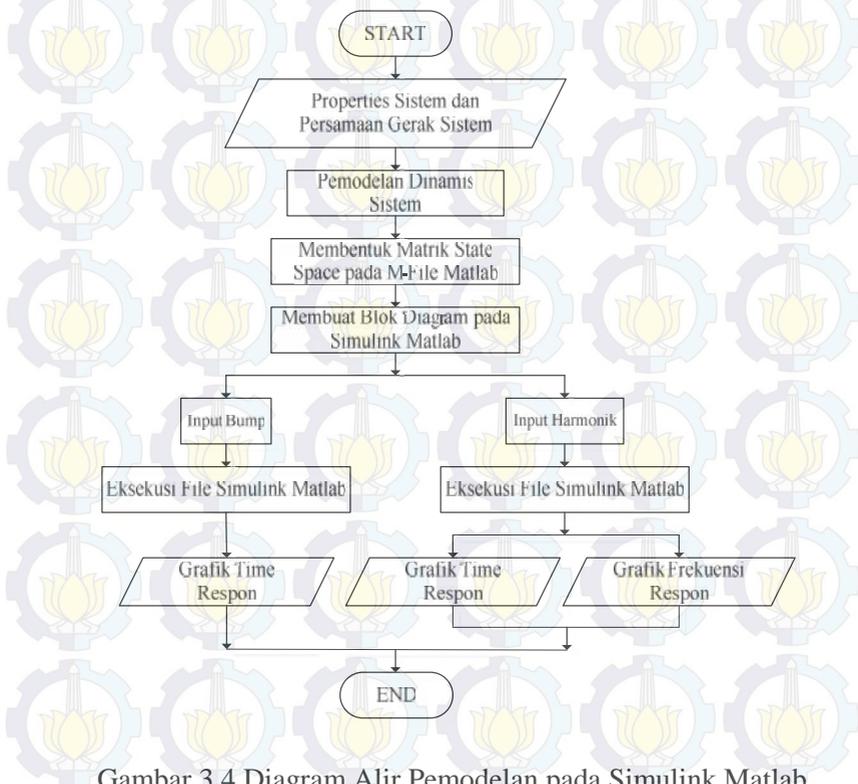
Secara garis besar proses pembuatan persamaan gerak dapat ditransformasikan menjadi diagram alir pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram Alir Pemodelan Matematis

### 3.5 Tahap Pembuatan Blok Simulasi

Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan dari pemodelan matematis, dalam tugas akhir ini akan dibuat blok simulasi dengan bantuan software Simulink Matlab. Simulasi ini pada dasarnya melakukan penyelesaian persamaan matematis dari pemodelan *half car* dengan menggunakan metode *state space*. Saat eksekusi simulasi, digunakan dua macam input yaitu berupa input step (impulsif) yang merepresentasikan *bump* maupun profil jalan yang tidak rata dan input sinusoidal (harmonik) yang merepresentasikan kondisi jalan yang bergelombang.



Gambar 3.4 Diagram Alir Pemodelan pada Simulink Matlab

### 3.6 Tahap Analisis Hasil

Dari pemodelan pada Simulink Matlab didapat output data respon dinamis berupa grafik perpindahan, kecepatan dan percepatan bodi sistem yang ditunjukkan dengan grafik *Time Respon* dan *Frekuensi Respon* selain itu juga dapat diketahui frekuensi natural sistem. Variabel Sistem yang dianalisis adalah perbedaan kontur jalan dan kecepatan dari bus. Kontur jalan yang divariasikan bernilai 0,01 – 0,03 m. Untuk variasi kecepatan yaitu 0 – 100 km/jam sehingga dapat diketahui kenyamanan pengendara ketika sedang berkendara.

Kesimpulan yang dicari meliputi berapa besar percepatan yang dihasilkan model, serta respon dinamis perpindahan, kecepatan dan percepatan bodi sistem simulasi input sebagai permukaan jalan yang tidak rata sehingga dapat ditentukan kenyamanan dari pengendara.

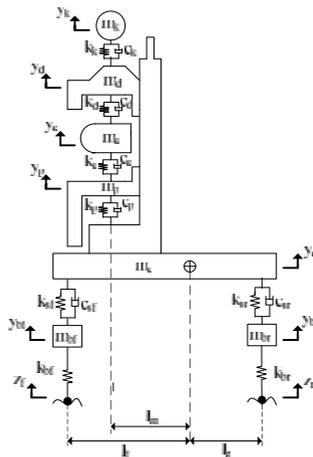
## BAB IV PEMODELAN SISTEM

### 4.1 Pemodelan Matematis

Dalam Tugas Akhir ini akan dibahas mengenai pemodelan kendaraan angkut massal (bus) dan pengemudinya dimana memerlukan model matematis. Bus memiliki 4 roda namun pada tugas akhir ini akan dimodelkan setengah kendaraan. Selain itu, pengemudi bus dianalisa dengan menggunakan sistem Multi-DOF. Pemodelan setengah kendaraan dari bus dianalisa dengan empat derajat kebebasan (4 DOF) untuk pemodelan pengemudinya dengan empat derajat kebebasan (4 DOF).

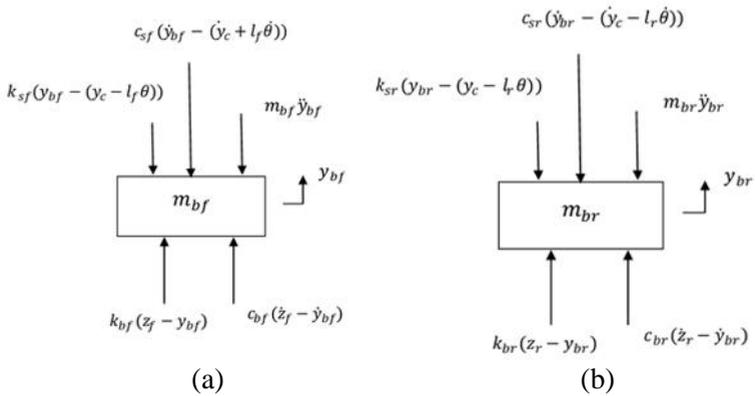
#### 4.1.1 Pemodelan Matematis Setengah Kendaraan Angkut Massal (Bus) dengan Pengemudinya (8 DOF)

Gambar sistem dari pemodelan matematis setengah kendaraan dengan empat derajat kebebasan (4 DOF) dan pengemudinya dengan empat derajat kebebasan (4 DOF) dapat dilihat pada gambar 4.1 dibawah ini:



Gambar 4.1 Model Matematis Pengemudi Transportasi Massal (Bus) dan Kendaraannya

Dari gambar diatas terlihat bahwa terdapat 8 derajat kebebasan yang terdiri dari roda depan kendaraan dengan notasi  $y_{bf}$ , roda belakang kendaraan dengan notasi  $y_{br}$ , chassis kendaraan dengan notasi  $y_c$ , faktor pitching dan bouncing yang mempengaruhi kendaraan, pinggul pengemudi dengan notasi  $y_p$ , perut pengemudi dengan notasi  $y_e$ , dada pengemudi dengan notasi  $y_d$ , dan kepala pengemudi dengan notasi  $y_k$ . Maka, dari gambar 4.1 dapat dibuat *Free Body Diagram* sebagai berikut:

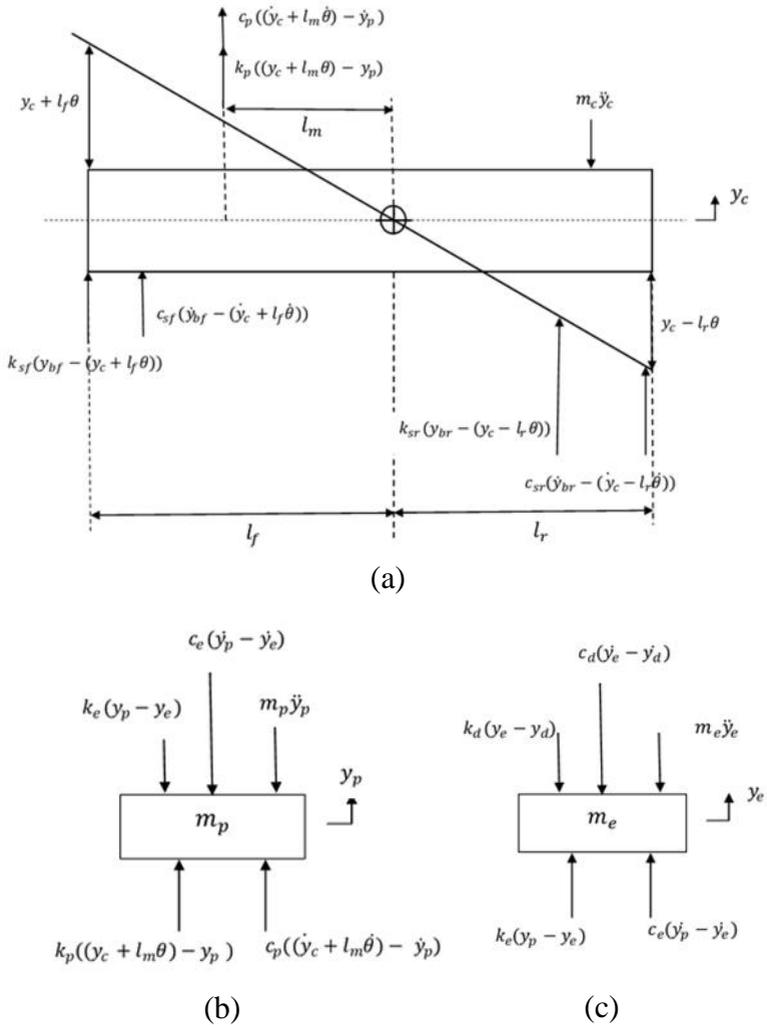


Gambar 4.2 (a) *Free Body Diagram* Ban Depan, (b) *Free Body Diagram* Ban Belakang

Dari gambar 4.2 diperoleh persamaan gerak dibawah ini:

$$m_{bf} \ddot{y}_{bf} + k_{sf}(y_{bf} - (y_c - l_f \theta)) - k_{bf}(z_f - y_{bf}) + c_{sf}(\dot{y}_{bf} - (\dot{y}_c + l_f \dot{\theta})) - c_{bf}(\dot{z}_f - \dot{y}_{bf}) = 0 \quad (4.1)$$

$$m_{br} \ddot{y}_{br} + k_{sr}(y_{br} - (y_c - l_r \theta)) - k_{br}(z_r - y_{br}) + c_{sr}(\dot{y}_{br} - (\dot{y}_c - l_r \dot{\theta})) - c_{br}(\dot{z}_r - \dot{y}_{br}) = 0 \quad (4.2)$$



Gambar 4.3 (a) *Free Body Diagram Chassis Kendaraan*, (b) *Free Body Diagram Pinggul Pengemudi*, (c) *Free Body Diagram Perut Pengemudi*

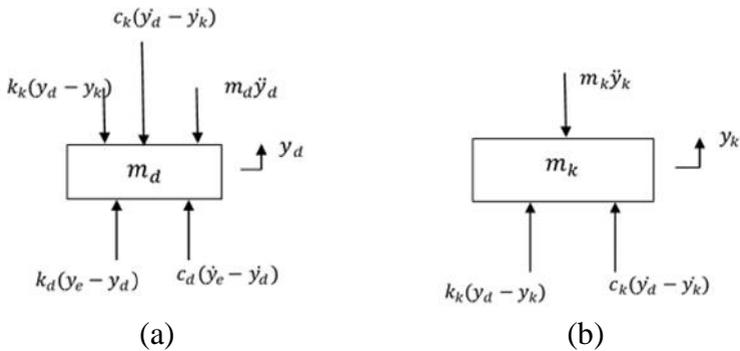
Dari gambar 4.3 diperoleh persamaan gerak dibawah ini:

$$m_c \ddot{y}_c + k_p((y_c + l_m \theta) - y_p) - k_{sf}(y_{bf} - (y_c + l_f \theta)) - k_{sr}(y_{br} - (y_c - l_r \theta)) + c_p((\dot{y}_c + l_m \dot{\theta}) - \dot{y}_p) - c_{sf}(\dot{y}_{bf} - (\dot{y}_c + l_f \dot{\theta})) - c_{sr}(\dot{y}_{br} - (\dot{y}_c - l_r \dot{\theta})) = 0 \quad (4.3)$$

$$J \ddot{\theta} + k_p l_m((y_c + l_m \theta) - y_p) - k_{sf} l_f(y_{bf} - (y_c + l_f \theta)) + k_{sr} l_r(y_{br} - (y_c - l_r \theta)) + c_p l_m((\dot{y}_c + l_m \dot{\theta}) - \dot{y}_p) - c_{sf} l_f(\dot{y}_{bf} - (\dot{y}_c + l_f \dot{\theta})) + c_{sr} l_r(\dot{y}_{br} - (\dot{y}_c - l_r \dot{\theta})) = 0 \quad (4.4)$$

$$m_p \ddot{y}_p + k_e(y_p - y_e) - k_p((y_c + l_m \theta) - y_p) + c_e(\dot{y}_p - \dot{y}_e) - c_p((\dot{y}_c + l_m \dot{\theta}) - \dot{y}_p) = 0 \quad (4.5)$$

$$m_e \ddot{y}_e + k_d(y_e - y_d) - k_e(y_p - y_e) + c_d(\dot{y}_e - \dot{y}_d) - c_e(\dot{y}_p - \dot{y}_e) = 0 \quad (4.6)$$



Gambar 4.4 (a) *Free Body Diagram* Chassis Dada Pengemudi, (b) *Free Body Diagram* Kepala Pengemudi

Dari gambar 4.4 diperoleh persamaan gerak dibawah ini:

$$m_d \ddot{y}_d + k_k(y_d - y_k) - k_d(y_e - y_d) + c_k(\dot{y}_d - \dot{y}_k) - c_d(\dot{y}_e - \dot{y}_d) = 0 \quad (4.7)$$

$$m_k \ddot{y}_k - k_k(y_d - y_k) - c_k(\dot{y}_d - \dot{y}_k) = 0 \quad (4.8)$$

Persamaan (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), dan (4.8) dapat juga ditulis :

$$\ddot{y}_{bf} = \frac{1}{m_{bf}} [k_{bf}(z_f - y_{bf}) - k_{sf}(y_{bf} - (y_c + l_f\theta)) - c_{sf}(\dot{y}_{bf} - (\dot{y}_c + l_f\dot{\theta})) + c_{bf}(\dot{z}_f - \dot{y}_{bf})] \quad (4.9)$$

$$\ddot{y}_{br} = \frac{1}{m_{br}} [k_{br}(z_r - y_{br}) - k_{sr}(y_{br} - (y_c - l_r\theta)) - c_{sr}(\dot{y}_{br} - (\dot{y}_c - l_r\dot{\theta})) + c_{br}(\dot{z}_r - \dot{y}_{br})] \quad (4.10)$$

$$\ddot{y}_c = \frac{1}{m_c} [[k_{sf}(y_{bf} - (y_c + l_f\theta)) + k_{sr}(y_{br} - (y_c - l_r\theta)) - k_p((y_c + l_m\theta) - y_p) - c_p((\dot{y}_c - l_m\dot{\theta}) - \dot{y}_p) + c_{sf}(\dot{y}_{bf} - (\dot{y}_c + l_f\dot{\theta})) + c_{sr}(\dot{y}_{br} - (\dot{y}_c - l_r\dot{\theta}))]] \quad (4.11)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J} [k_{sf}l_f(y_{bf} - (y_c + l_f\theta)) - k_p l_m((y_c + l_m\theta) - y_p) - k_{sr}l_r(y_{br} - (y_c - l_r\theta)) - c_p l_m((\dot{y}_c + l_m\dot{\theta}) - \dot{y}_p) + c_{sf}l_f(\dot{y}_{bf} - (\dot{y}_c + l_f\dot{\theta})) - c_{sr}l_r(\dot{y}_{br} - (\dot{y}_c - l_r\dot{\theta}))] \quad (4.12)$$

$$\ddot{y}_p = \frac{1}{m_p} [k_p((y_c + l_m\theta) - y_p) - k_e(y_p - y_e) - c_e(\dot{y}_p - \dot{y}_e) + c_p((\dot{y}_c + l_m\dot{\theta}) - \dot{y}_p)] \quad (4.13)$$

$$\ddot{y}_e = \frac{1}{m_e} [k_e(y_p - y_e) - k_d(y_e - y_d) - c_d(\dot{y}_e - \dot{y}_d) + c_e(\dot{y}_p - \dot{y}_e)] \quad (4.14)$$

$$\ddot{y}_d = \frac{1}{m_d} [(k_d(y_e - y_d) - k_k(y_d - y_k) - c_k(\dot{y}_d - \dot{y}_k) + c_d(\dot{y}_e - \dot{y}_d)] \quad (4.15)$$

$$\ddot{y}_k = \frac{1}{m_k} [c_k(\dot{y}_d - \dot{y}_k) + k_k(y_d - y_k)] \quad (4.16)$$

Penyusunan matrik *state space* :

$$X = [y_{bf} \ y_{br} \ y_c \ \theta \ y_p \ y_e \ y_d \ y_k \ v_1 \ v_2 \ v_3 \ \omega \ v_5 \ v_6 \ v_7 \ v_8]^T$$

$$\dot{X} = [\dot{y}_{bf} \ \dot{y}_{br} \ \dot{y}_c \ \dot{\theta} \ \dot{y}_p \ \dot{y}_e \ \dot{y}_d \ \dot{y}_k \ \dot{v}_1 \ \dot{v}_2 \ \dot{v}_3 \ \dot{\omega} \ \dot{v}_5 \ \dot{v}_6 \ \dot{v}_7 \ \dot{v}_8]^T$$

Persamaan *state space* :

$$\dot{X} = AX + Gu$$

Dari pemodelan matematis diatas didapatkan nilai dari matriks A, G, dan u. Penulisan matrik *input* dan *output* akan dituliskan pada lampiran A1. Lalu dengan metode *state space*

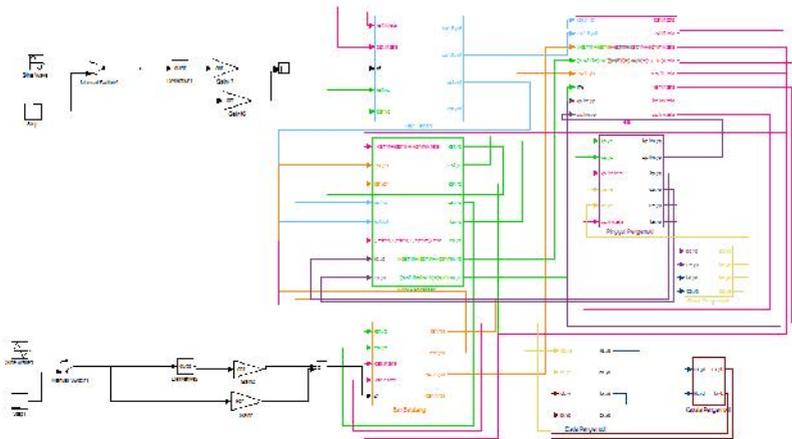
akan didapatkan nilai  $(\ddot{y}_{bf}, \ddot{y}_{br}, \ddot{y}_c, \ddot{\theta}, \ddot{y}_p, \ddot{y}_e, \ddot{y}_d, \ddot{y}_k, \dot{y}_{bf}, \dot{y}_{br}, \dot{y}_c, \dot{\theta}, \dot{y}_p, \dot{y}_e, \dot{y}_d, \dot{y}_k, y_{bf}, y_{br}, y_c, \theta, y_p, y_e, y_d, y_k)$ . Data yang didapatkan tersebut merupakan hasil simulasi yang berupa *frequency response*.

## 4.2. Pemodelan Pada Matlab

Setelah membuat pemodelan matematis dari seperempat kendaraan angkut massal (bus), maka didapatkan matrik input dan matrik output dalam bentuk variable-variabel state space. Variabel inilah yang akan membantu dalam membuat simulasi pada Matlab.

### 4.2.1 Pemodelan *Time Response*

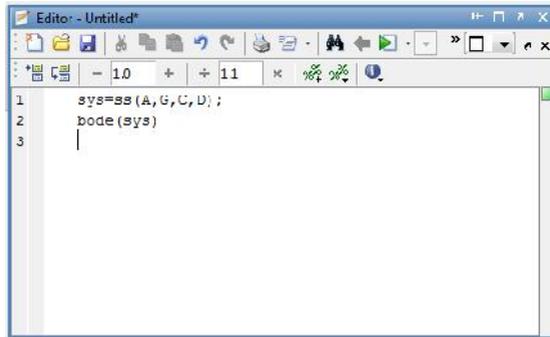
Untuk mendapatkan hasil simulasi yang berupa *time response* maka persamaan yang berada di atas dibuat ke bentuk diagram blok dalam Simulink. Input yang digunakan adalah bentuk eksitasi step dan sinusoidal untuk analisa *time response*. Dari diagram blok pada simulink, dianalisis perubahan amplitudo dan kecepatan untuk mengetahui respon dinamis pengemudi (perpindahan, kecepatan, dan percepatan). Untuk eksitasi berbentuk step dengan amplitudo 0,1 m. Sedangkan untuk input sinusoidal kecepatan yang dianalisa yaitu 40, 60, dan 100 km/jam dengan variasi amplitudo 1, 2, dan 3 cm. Gambar 4.5 merupakan blok simulink keseluruhan yang digunakan selama simulasi. Untuk bagian-bagian yang berada di dalamnya akan dibahas pada lampiran A2.



Gambar 4.5 Diagram Blok Simulink Secara Keseluruhan

#### 4.2.2. Pemodelan *Frequency Response*

Pemodelan *frekuensi response* dapat dilakukan dengan *open loop transfer function* maupun dengan menggunakan matrik dari *state variable*. Pada tugas akhir ini, pemodelan *frequency response* yang digunakan adalah dengan matrik dari *state variable*, karena pada *open loop transfer function* sulit untuk mencari *transfer function* pada sistem multi dof. Pemodelan *frekuensi response* pada Matlab dimulai dengan membuat m-file pada Matlab yang berisi nilai dari parameter yang digunakan, matrik input, matrik output, dan matrik identitas dari pemodelan matematis pada sub-bab sebelumnya. Pemodelan *frekuensi response* dilakukan dengan menggunakan m-file dari *time response* dengan menambahkan matrik output dan menuliskan perintah-perintah sebagai berikut.



Gambar 4.6 Metode Bode Diagram pada Matlab

Perintah-perintah ini yang akan digunakan pada M-file pada matlab. Setelah perintah-perintah ini dimasukkan dan m-file Matlab di'running' maka akan didapatkan grafik *bode diagram* (*magnitude* dan *fase*).

#### 4.3 Parameter Komponen Bus dan Pengemudi

Pada tugas akhir ini akan dibahas mengenai kenyamanan pengemudi bus. Parameter yang digunakan dalam tugas akhir ini berasal dari jurnal ilmiah. Tabel 4.1 merupakan parameter yang digunakan untuk kendaraan (bus) dan pengemudi merupakan parameter mengenai tubuh pengemudi:

Tabel 4.1 Parameter Komponen Kendaraan dan Pengemudi

Keterangan Komponen	Simbol	Nilai	Satuan
Kendaraan			
Massa Ban Depan	$m_{bf}$	745	kg
Massa Ban Belakang	$m_{br}$	1355	kg
Massa Kendaraan	$m_c$	11900	kg
Inersia Kendaraan	J	50000	$kg.m^2$
Konstanta Kekakuan Ban Depan	$k_{bf}$	1000000	N/m
Konstanta Kekakuan Ban Belakang	$k_{br}$	2000000	N/m

Lanjutan Tabel 4.1

Konstanta Kekakuan Suspensi Depan	$k_{sf}$	350000	N/m
Konstanta Kekakuan Suspensi Belakang	$k_{sr}$	811250	N/m
Konstanta Peredam Suspensi Depan	$c_{sf}$	40000	N.s/m
Konstanta Peredam Suspensi Belakang	$c_{sr}$	45973	N.s/m
Jarak Ban Depan ke <i>center of gravity</i>	$l_f$	3,12	m
Jarak Ban Belakang ke <i>center of gravity</i>	$l_r$	2.53	m
Pengemudi			
Massa Kepala	$m_k$	5,625	kg
Massa Dada	$m_d$	30,15	kg
Massa Perut	$m_e$	9,15	kg
Massa Pinggul	$m_p$	13,65	kg
Konstanta Kekakuan Kepala	$k_k$	310000	N/m
Konstanta Kekakuan Dada	$k_d$	183000	N/m
Konstanta Kekakuan Perut	$k_e$	162800	N/m
Konstanta Kekakuan Pinggul	$k_p$	90000	N/m
Konstanta Peredam Kepala	$c_k$	400	N.s/m
Konstanta Peredam Dada	$c_d$	4750	N.s/m
Konstanta Peredam Perut	$c_e$	4585	N.s/m
Konstanta Peredam Pinggul	$c_p$	2064	N.s/m
Jarak Pengemudi ke <i>center of gravity</i>	$l_m$	4,62	m



**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## BAB V

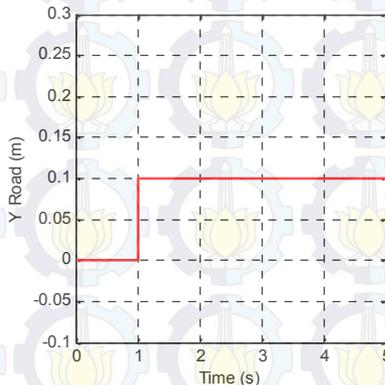
### ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 5.1. Respon Pengemudi dengan Pemodelan *Time Response*

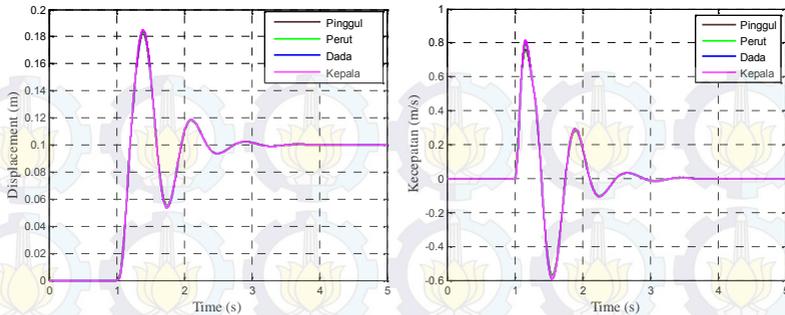
Simulasi yang dilakukan akan menghasilkan respon getaran kendaraan dan pengemudi pada masing-masing input. Namun, dalam pembahasan dalam laporan ini hanya mengenai respon pengemudi sedangkan untuk kendaraan akan dituliskan pada lampiran. Respon getaran tersebut berupa perpindahan (*displacement*), kecepatan (*velocity*), dan percepatan (*acceleration*). Pada sub-bab ini akan dibandingkan masing-masing respon getaran berdasarkan dua macam input yang diberikan. Adapun dua macam input tersebut adalah profil jalan berupa impulsif dan jalan bergelombang (sinusoidal) dengan amplitudo 1 cm, 2 cm, dan 3 cm serta variasi kecepatan kendaraan 40 km/jam, 60 km/jam, dan 100 km/jam.

##### 5.1.1 Respon Pengemudi dengan Input Step

Eksitasi impuls yang digunakan adalah dengan input step. Besar input step yang digunakan pada simulasi adalah 0.1 meter. Gambar dari eksitasi input step dapat dilihat pada gambar 5.1.

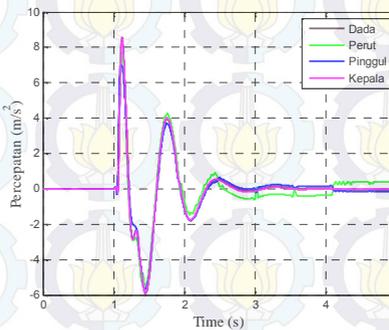


Gambar 5.1 Profil Eksitasi Impuls



(a)

(b)



(c)

Gambar 5.2 Grafik *Time Response* Bagian Tubuh Pengemudi dengan Input Step (a) Perpindahan (*Displacement*), (b) Kecepatan (*Velocity*), dan (c) Percepatan (*Acceleration*)

Grafik respon yang dimiliki pengemudi ketika diberi input step memiliki tren meningkat drastis di awal, kemudian menurun seiring berjalannya waktu. Pada gambar 5.2 (a) terlihat respon perpindahan yang dialami bagian tubuh pengemudi. Pada grafik terlihat perpindahan maksimum yang dialami kepala pengemudi yaitu 0,185 m, dada pengemudi mengalami perpindahan maksimum sebesar 0,184 m, perut pengemudi mengalami

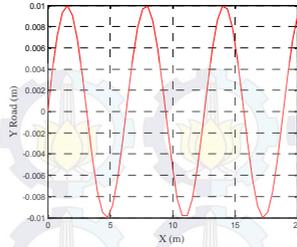
perpindahan maksimum sebesar 0,183 m, dan untuk pinggul terjadi perpindahan maksimum sebesar 0,182 m. Perpindahan yang terjadi pada pengemudi relatif sama. Waktu yang diperlukan oleh tubuh pengemudi untuk mencapai kondisi stabil adalah 2 detik.

Pada gambar 5.2 (b) merupakan respon kecepatan yang dialami oleh tubuh pengemudi. Pada grafik terlihat respon kecepatan dan perpindahan yang dialami pengemudi memiliki tren yang hampir sama yaitu kepala memiliki respon paling besar adalah kepala kemudian diikuti oleh dada, perut dan pinggul. Respon kecepatan maksimum yang terjadi pada kepala pengemudi adalah 0,815 m/s. Dada pengemudi mengalami respon kecepatan maksimum sebesar 0,81 m/s. Perut pengemudi mengalami kecepatan maksimum sebesar 0,792 m/s. Pinggul pengemudi mengalami respon kecepatan maksimum sebesar 0,76 m/s. Waktu yang diperlukan oleh tubuh pengemudi untuk mencapai kondisi stabil adalah 2 detik.

Respon percepatan yang ditunjukkan oleh pengemudi terlihat pada gambar 5.2 (c). Pada grafik diatas terlihat percepatan maksimum yang dialami kepala adalah  $8,945 \text{ m/s}^2$ , dada adalah  $8,94 \text{ m/s}^2$ , perut adalah  $8,1 \text{ m/s}^2$ , dan pinggul adalah  $7,45 \text{ m/s}^2$ . Percepatan maksimum yang dialami pengemudi relatif sama. Waktu yang diperlukan oleh tubuh pengemudi untuk mencapai kondisi stabil adalah 2 detik.

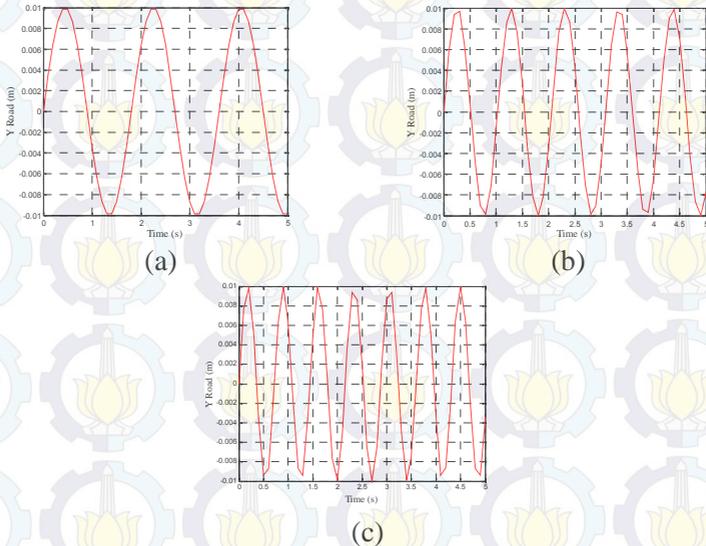
### **5.1.2 Respon Pengemudi dengan Input Sinusoidal**

Pada input sinusoidal, digunakan tiga macam kecepatan kendaraan (40 km/jam, 60 km/jam, dan 100 km/jam) yang melintasi tiga variasi jalan dengan gelombang sinus dengan amplitudo 1 cm, 2 cm, dan 3 cm serta panjang gelombang ( $\lambda$ ) 20 m. Eksitasi sinusoidal sendiri menggambarkan profil jalan yang bergelombang dilalui oleh kendaran. Gambar 5. 6 merupakan salah satu input dengan amplitudo 1 cm.



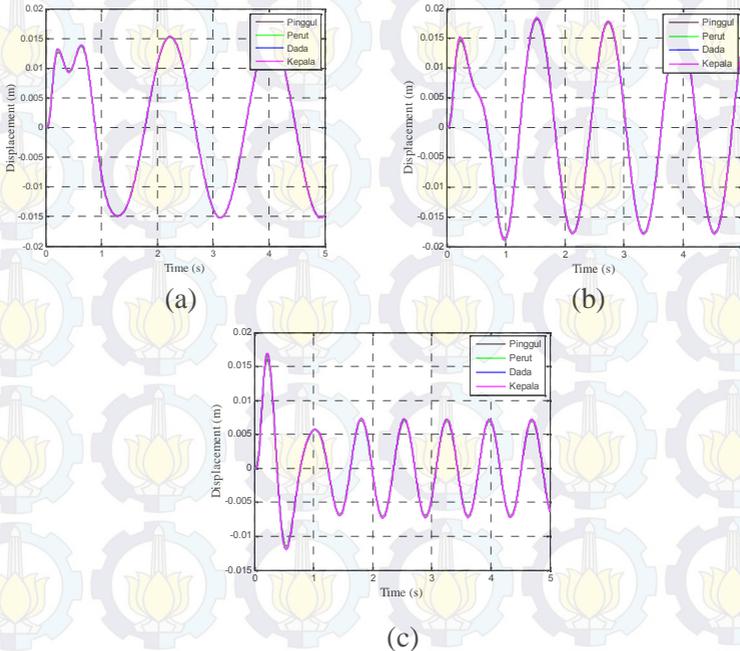
Gambar 5.3 Profil Eksitasi Sinusoidal

Dengan perhitungan frekuensi ( $\omega$ ) input  $\omega = 2\pi f$  dimana  $f = v/\lambda$ , sehingga didapatkan frekuensi input untuk kecepatan kendaraan 40 km/jam adalah  $\omega = 3,49$  rad/s, kecepatan kendaraan 60 km/jam adalah  $\omega = 5,237$  rad/s, dan untuk kecepatan kendaraan 100 km/jam adalah  $\omega = 8,73$  rad/s. Sehingga dapat digambarkan dengan grafik fungsi waktu dengan salah satu amplitudo yaitu sebesar 1 cm adalah sebagai berikut:



Gambar 5.4 Sumber Eksitasi Sinusoidal dengan amplitudo 1 cm dan variasi kecepatan: (a)  $v_1=40$  km/jam, (b).  $v_2=60$  km/jam, (c).  $v_3=100$  km/jam

### 5.1.2.1 Respon Pengemudi pada Amplitudo 1 cm dengan Kecepatan 40, 60, dan 100 km/jam

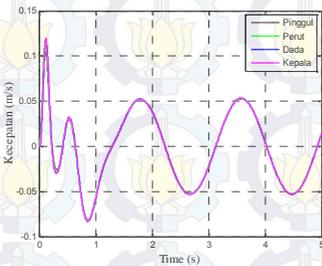


Gambar 5.5 Grafik *Time Response* Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Perpindahan (*Displacement*) pada kec. 40 km/jam, (b). Perpindahan (*Displacement*) pada kec. 60 km/jam, (c). Perpindahan (*Displacement*) pada kec. 100 km/jam

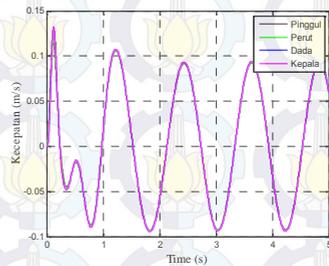
Pada gambar 5.5 (a) terlihat respon perpindahan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 40 km/jam dan amplitudo 0,01 m. Pada grafik terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Perpindahan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,01529$  m, dada adalah  $\pm 0,01577$  m, perut adalah  $\pm 0,0152$  m dan pinggul adalah  $\pm 0,0151$  m. Terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

Pada gambar 5.5 (b) terlihat respon perpindahan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 60 km/jam dan amplitudo 0,01 m. Pada grafik terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Perpindahan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,01791$  m, dada adalah  $\pm 0,0179$  m, perut adalah  $\pm 0,0178$  m dan pinggul adalah 0,0176 m. Terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

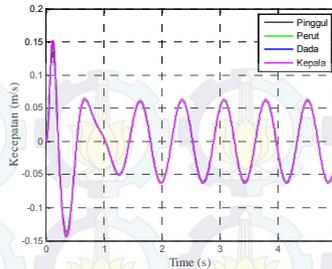
Pada gambar 5.5 (c) terlihat respon perpindahan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 100 km/jam dan amplitudo 0,01 m. Pada grafik terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Perpindahan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,00725$  m, dada adalah  $\pm 0,00722$  m, perut adalah  $\pm 0,00712$  m dan pinggul adalah  $\pm 0,0069$  m. Terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.



(a)



(b)



(c)

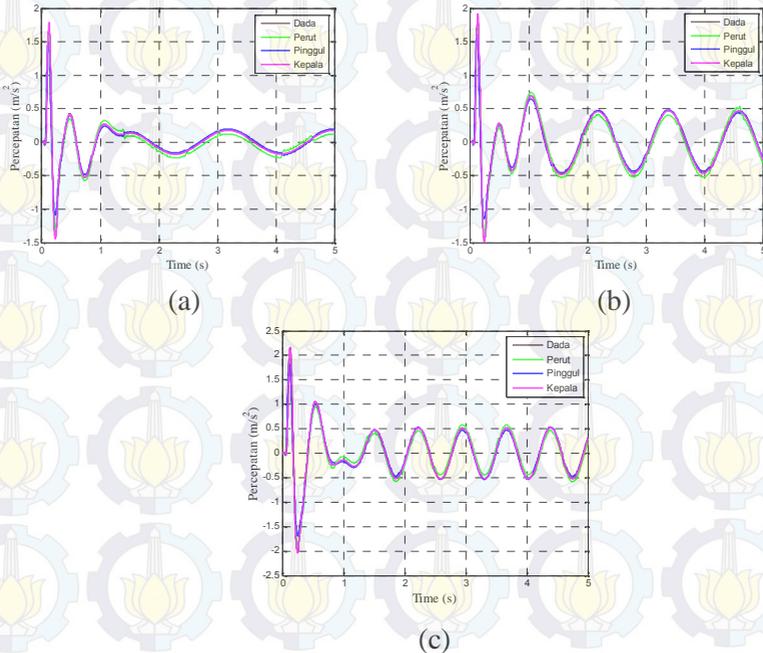
Gambar 5.6 Grafik *Time Response* Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Kecepatan (*Velocity*) pada kec. 40 km/jam, (b). Kecepatan (*Velocity*) pada kec. 60 km/jam, (c). Kecepatan (*Velocity*) pada kec. 100 km/jam

Pada gambar 5.6 (a) terlihat respon kecepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 40 km/jam dan amplitudo 0,01 m. Pada grafik terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Kecepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,0532$  m/s, dada adalah  $\pm 0,053$  m/s, perut adalah  $\pm 0,0528$  m/s, dan pinggul adalah  $\pm 0,0527$  m/s. Terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

Pada gambar 5.6 (b) terlihat respon kecepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 60 km/jam dan amplitudo 0,01 m. Pada grafik terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Kecepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,0937$  m/s, dada adalah  $\pm 0,0936$  m/s, perut adalah  $\pm 0,0932$  m/s, dan pinggul adalah  $\pm 0,0924$  m/s. Terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama

Pada gambar 5.6 (c) terlihat respon kecepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 100 km/jam dan amplitudo 0,01 m. Pada grafik terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Kecepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,063$  m/s, dada adalah  $\pm 0,0629$  m/s, perut adalah  $\pm 0,062$

m/s, dan pinggul adalah  $\pm 0,06$  m/s. Terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

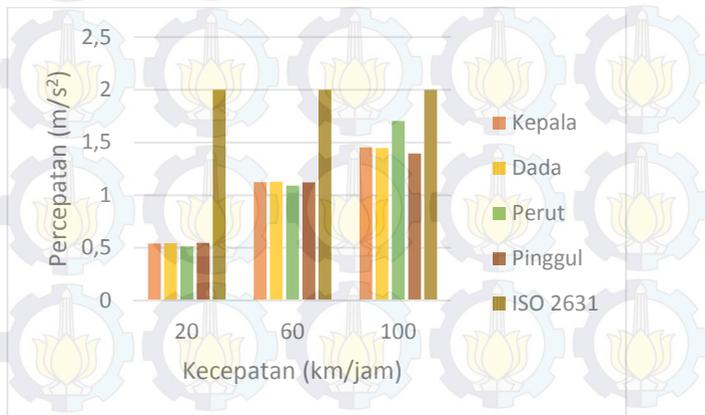


Gambar 5.7 Grafik *Time Response* Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Percepatan (*Acceleration*) pada kec. 40 km/jam, (b). Percepatan (*Acceleration*) pada kec. 60 km/jam, (c). Percepatan (*Acceleration*) pada kec. 100 km/jam

Pada gambar 5.7 (a) terlihat respon percepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 40 km/jam dan amplitudo 0,01 m. Pada grafik terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Percepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,185$   $m/s^2$ , dada adalah  $\pm 0,18$   $m/s^2$ , perut adalah  $\pm 0,15$   $m/s^2$ , dan pinggul adalah  $\pm 0,14$   $m/s^2$ . Terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama

Pada gambar 5.7 (b) terlihat respon percepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 60 km/jam dan amplitudo 0,01 m. Pada grafik terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Percepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,49 \text{ m/s}^2$ , dada adalah  $\pm 0,48 \text{ m/s}^2$ , perut adalah  $\pm 0,45 \text{ m/s}^2$ , dan pinggul adalah  $\pm 0,44 \text{ m/s}^2$ . Terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama

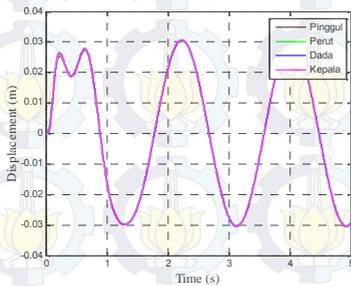
Pada gambar 5.7 (c) terlihat respon percepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 100 km/jam dan amplitudo 0,01 m. Pada grafik terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Percepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,55 \text{ m/s}^2$ , dada adalah  $\pm 0,54 \text{ m/s}^2$ , perut adalah  $\pm 0,5 \text{ m/s}^2$ , dan pinggul adalah  $\pm 0,45 \text{ m/s}^2$ . Terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama. Gambar dibawah ini merupakan RMS percepatan yang dialami oleh bagian tubuh pengemudi pada variasi kecepatan yang dilakukan selama simulasi:



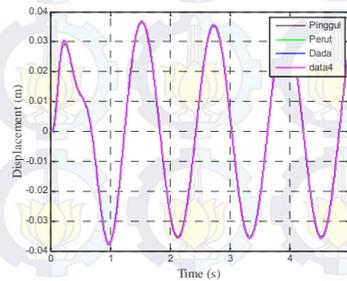
Gambar 5.8 Grafik Nilai RMS Percepatan Bagian Tubuh Pengemudi Untuk Kecepatan yang Bervariasi

Pada gambar 5.8 RMS percepatan yang dialami tubuh pengemudi pada kecepatan 40, 60, dan 100 km/jam kurang dari  $2 \text{ m/s}^2$ . Berdasarkan ISO 2631 RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi pada kecepatan 40 km/jam berada dalam kondisi tidak ada keluhan. Pada kecepatan 60 km/jam RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi menurut ISO 2631 berada pada kondisi sedikit tidak nyaman. Berdasarkan ISO 2631 RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi pada kecepatan 100 km/jam pengemudi berada pada kondisi sedikit tidak nyaman.

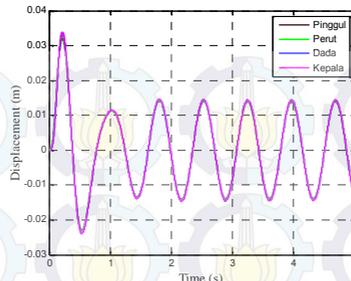
### 5.1.2.2 Respon Pengemudi pada Amplitudo 2 cm dengan Kecepatan 40, 60, dan 100 km/jam



(a)



(b)



(c)

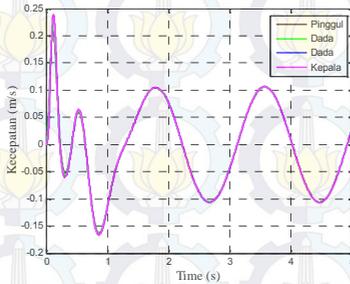
Gambar 5.9 Grafik *Time Response* Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Perpindahan (*Displacement*) pada kec. 40 km/jam, (b). Perpindahan (*Displacement*) pada kec. 60 km/jam, (c). Perpindahan (*Displacement*) pada kec. 100 km/jam

Pada gambar 5.9 (a) terlihat respon perpindahan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 40 km/jam dan amplitudo 0,02 m. Pada grafik terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Perpindahan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,0305$  m, dada adalah  $\pm 0,03045$  m, perut adalah  $\pm 0,0304$  m dan pinggul adalah  $\pm 0,0303$  m. Terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

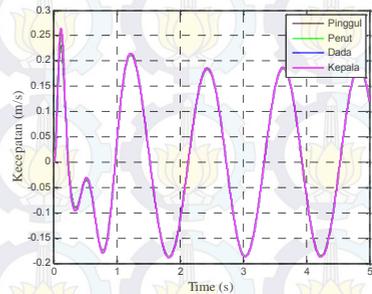
Pada gambar 5.9 (b) terlihat respon perpindahan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 60 km/jam dan amplitudo 0,02 m. Pada grafik terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Perpindahan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,0357$  m, dada adalah  $\pm 0,0356$  m, perut adalah  $\pm 0,0355$  m dan pinggul adalah  $\pm 0,0353$  m. Terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

Pada gambar 5.9 (c) terlihat respon perpindahan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 100 km/jam dan amplitudo 0,02 m. Pada grafik terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Perpindahan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,0145$  m, dada adalah  $\pm 0,0144$  m, perut adalah  $\pm$

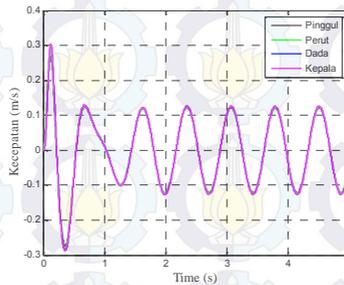
0,0142 m dan pinggul adalah  $\pm 0,014$  m. Terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.



(a)



(b)



(c)

Gambar 5.10 Grafik *Time Response* Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Kecepatan (*Velocity*) pada kec. 40 km/jam, (b).

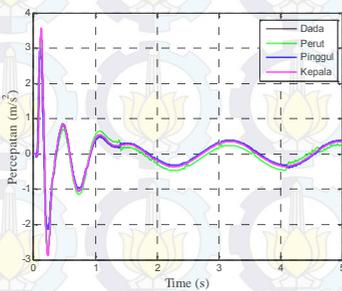
Kecepatan (*Velocity*) pada kec. 60 km/jam, (c). Kecepatan (*Velocity*) pada kec. 100 km/jam

Pada gambar 5.10 (a) terlihat respon kecepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 40 km/jam dan amplitudo 0,02 m. Pada grafik terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Kecepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,10642$  m/s, dada adalah  $\pm 0,1064$  m/s, perut adalah  $\pm$

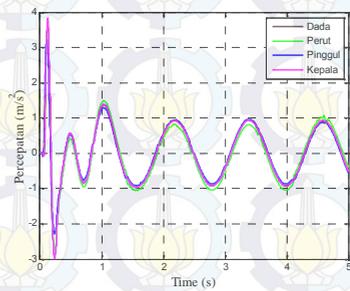
0,106 m/s, dan pinggul adalah  $\pm 0,1058$  m/s. Terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

Pada gambar 5.10 (b) terlihat respon kecepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 60 km/jam dan amplitudo 0,02 m. Pada grafik terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Kecepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,1873$  m/s, dada adalah  $\pm 0,1872$  m/s, perut adalah  $\pm 0,186$  m/s, dan pinggul adalah  $\pm 0,185$  m/s. Terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

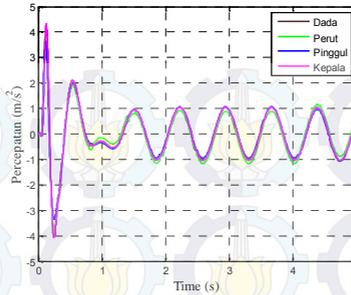
Pada gambar 5.10 (c) terlihat respon kecepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 100 km/jam dan amplitudo 0,02 m. Pada grafik terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Kecepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,126$  m/s, dada adalah  $\pm 0,125$  m/s, perut adalah  $\pm 0,124$  m/s, dan pinggul adalah  $\pm 0,121$  m/s. Terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.



(a)



(b)



(c)

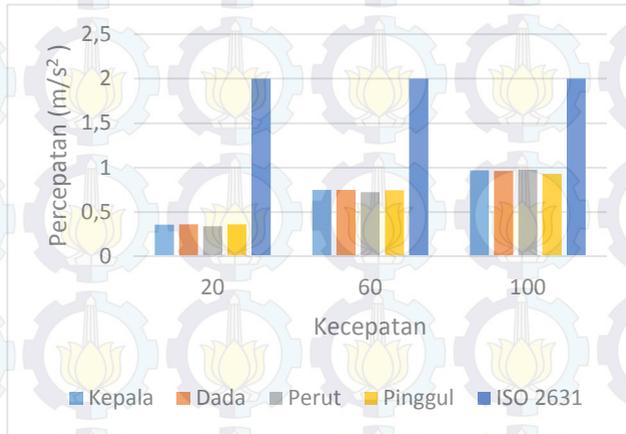
Gambar 5.11 Grafik *Time Response* Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Percepatan (*Acceleration*) pada kec. 40 km/jam, (b). Percepatan (*Acceleration*) pada kec. 60 km/jam, (c). Percepatan (*Acceleration*) pada kec. 100 km/jam

Pada gambar 5.11 (a) terlihat respon percepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 40 km/jam dan amplitudo 0,02 m. Pada grafik terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Percepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,37 \text{ m/s}^2$ , dada adalah  $\pm 0,36 \text{ m/s}^2$ , perut adalah  $\pm 0,3 \text{ m/s}^2$ , dan pinggul adalah  $\pm 0,365 \text{ m/s}^2$ . Terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

Pada gambar 5.11 (b) terlihat respon percepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 60 km/jam dan amplitudo 0,02 m. Pada grafik terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Percepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,98 \text{ m/s}^2$ , dada adalah  $\pm 1,02 \text{ m/s}^2$ , perut adalah  $\pm 0,9 \text{ m/s}^2$ , dan pinggul adalah  $\pm 1,1 \text{ m/s}^2$ . Terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

Pada gambar 5.11 (c) terlihat respon percepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 100 km/jam dan amplitudo 0,02 m. Pada grafik terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Percepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 1,15 \text{ m/s}^2$ , dada adalah  $\pm 1,1 \text{ m/s}^2$ , perut adalah  $\pm 1 \text{ m/s}^2$ ,

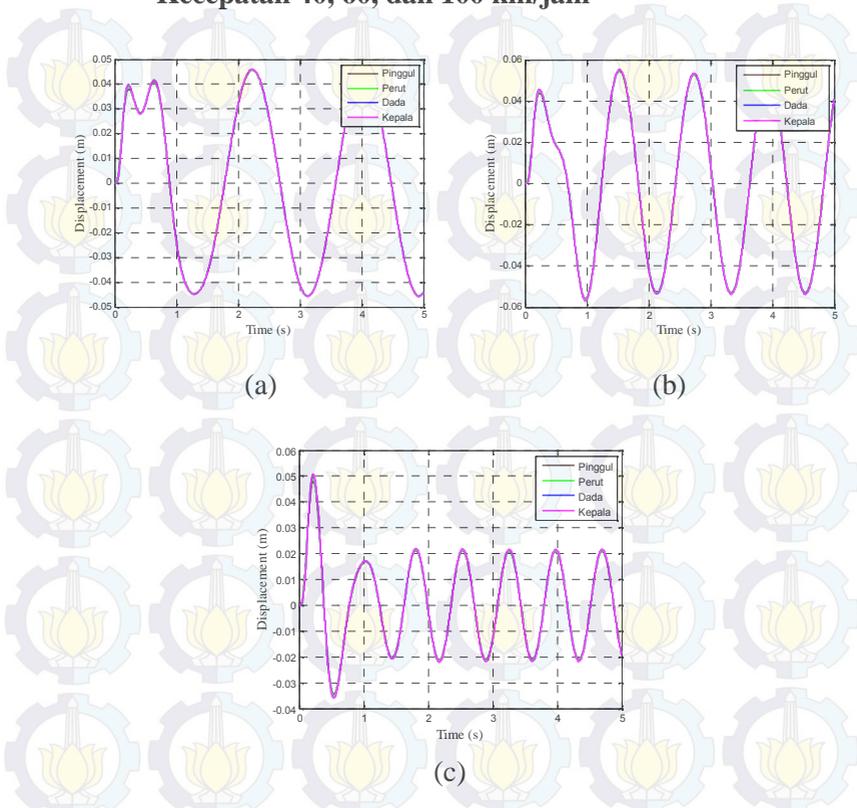
dan pinggul adalah  $\pm 0,9 \text{ m/s}^2$ . Terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama. Gambar dibawah ini merupakan RMS percepatan yang dialami oleh bagian tubuh pengemudi pada variasi kecepatan yang dilakukan selama simulasi:



Gambar 5.12 Grafik Nilai RMS Percepatan Bagian Tubuh Pengemudi Untuk Kecepatan yang Bervariasi

Pada gambar 5.12 merupakan RMS percepatan hasil simulasi yang dialami tubuh pengemudi. Pada kecepatan 40 km/jam menurut ISO 2631 percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi berada pada kondisi sedikit tidak nyaman. Berdasarkan ISO 2631 RMS percepatan yang dialami pengemudi pada kecepatan 60 km/jam pengemudi berada pada kondisi tidak nyaman. Pada kecepatan 100 km/jam RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi berada pada kondisi tidak nyaman.

### 5.1.2.3 Respon Pengemudi pada Amplitudo 3 cm dengan Kecepatan 40, 60, dan 100 km/jam



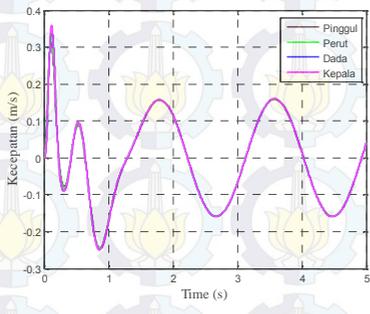
Gambar 5.13 Grafik *Time Response* Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Perpindahan (*Displacement*) pada kec. 40 km/jam, (b). Perpindahan (*Displacement*) pada kec. 60 km/jam, (c). Perpindahan (*Displacement*) pada kec. 100 km/jam

Pada gambar 5.13 (a) terlihat respon perpindahan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 40 km/jam dan amplitudo 0,03 m. Pada grafik terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Perpindahan maksimum untuk

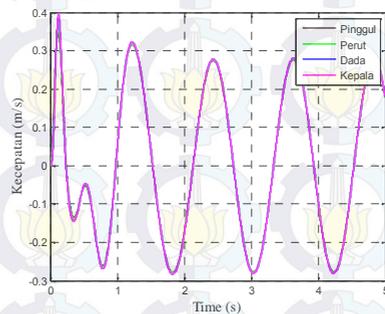
kepala adalah  $\pm 0,046$  m, dada adalah  $\pm 0,0457$  m, perut adalah  $\pm 0,0456$  m dan pinggul adalah  $\pm 0,0454$  m. Terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

Pada gambar 5.13 (b) terlihat respon perpindahan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 60 km/jam dan amplitudo 0,03 m. Pada grafik terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Perpindahan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,0535$  m, dada adalah  $\pm 0,0536$  m, perut adalah  $\pm 0,0523$  m dan pinggul adalah  $\pm 0,0529$  m. Terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

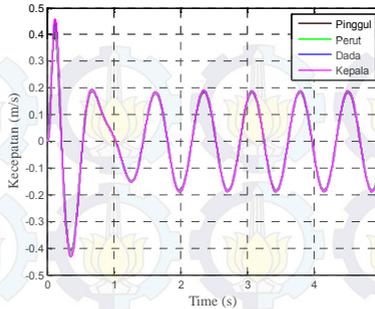
Pada gambar 5.13 (c) terlihat respon perpindahan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 100 km/jam dan amplitudo 0,03 m. Pada grafik terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Perpindahan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,0215$  m, dada adalah  $\pm 0,0216$  m, perut adalah  $\pm 0,0213$  m dan pinggul adalah  $\pm 0,0208$  m. Terlihat perpindahan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.



(a)



(b)



(c)

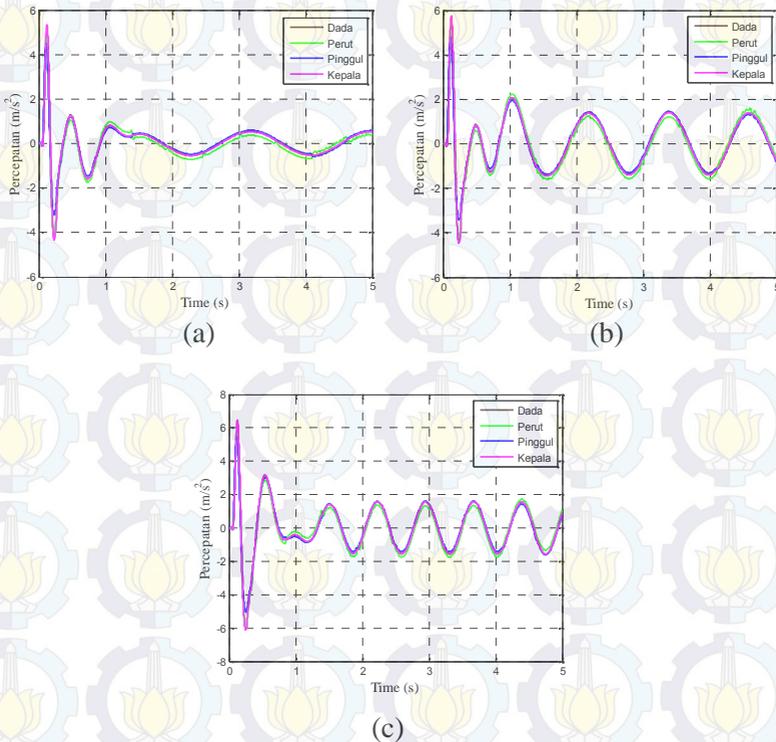
Gambar 5.14 Grafik *Time Response* Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Kecepatan (*Velocity*) pada kec. 40 km/jam, (b). Kecepatan (*Velocity*) pada kec. 60 km/jam, (c). Kecepatan (*Velocity*) pada kec. 100 km/jam

Pada gambar 5.14 (a) terlihat respon kecepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 40 km/jam dan amplitudo 0,03 m. Pada grafik terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Kecepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,1597$  m/s, dada adalah  $\pm 0,1596$  m/s, perut adalah  $\pm 0,16$  m/s, dan pinggul adalah  $\pm 0,1585$  m/s. Terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

Pada gambar 5.14 (b) terlihat respon kecepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 60 km/jam dan amplitudo 0,03 m. Pada grafik terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Kecepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,281$  m/s, dada adalah  $\pm 0,28$  m/s, perut adalah  $\pm 0,278$  m/s, dan pinggul adalah  $\pm 0,277$  m/s. Terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama

Pada gambar 5.14 (c) terlihat respon kecepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 100 km/jam dan amplitudo 0,03 m. Pada grafik terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Kecepatan maksimum untuk kepala

adalah  $\pm 0,189$  m/s, dada adalah  $\pm 0,188$  m/s, perut adalah  $\pm 0,185$  m/s, dan pinggul adalah  $\pm 0,182$  m/s. Terlihat kecepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.



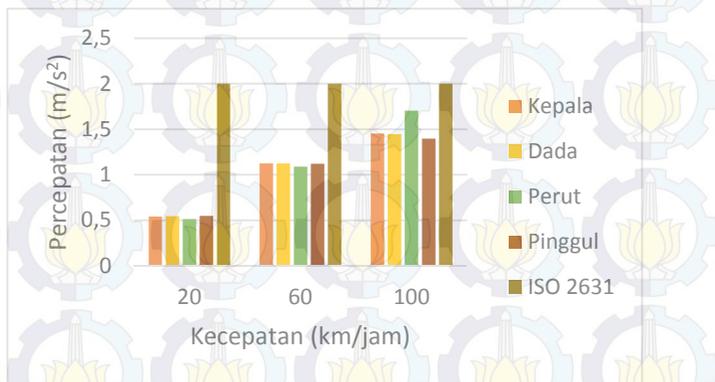
Gambar 5.15 Grafik *Time Response* Pengemudi dengan Input Sinusoidal, (a). Percepatan (*Acceleration*) pada kec. 40 km/jam, (b). Percepatan (*Acceleration*) pada kec. 60 km/jam, (c). Percepatan (*Acceleration*) pada kec. 100 km/jam

Pada gambar 5.15 (a) terlihat respon percepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 40 km/jam dan amplitudo 0,03 m. Pada grafik terlihat percepatan maksimum yang

dialami tubuh pengemudi. Percepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 0,556 \text{ m/s}^2$ , dada adalah  $\pm 0,56 \text{ m/s}^2$ , perut adalah  $\pm 0,5 \text{ m/s}^2$ , dan pinggul adalah  $\pm 0,56 \text{ m/s}^2$ . Terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

Pada gambar 5.15 (b) terlihat respon percepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 60 km/jam dan amplitudo 0,03 m. Pada grafik terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Percepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 1,47 \text{ m/s}^2$ , dada adalah  $\pm 1,48 \text{ m/s}^2$ , perut adalah  $\pm 1,46 \text{ m/s}^2$ , dan pinggul adalah  $\pm 1,45 \text{ m/s}^2$ . Terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

Pada gambar 5.15 (c) terlihat respon percepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 100 km/jam dan amplitudo 0,03 m. Pada grafik terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Percepatan maksimum untuk kepala adalah  $\pm 1,65 \text{ m/s}^2$ , dada adalah  $\pm 1,64 \text{ m/s}^2$ , perut adalah  $\pm 1 \text{ m/s}^2$ , dan pinggul adalah  $\pm 1,6 \text{ m/s}^2$ . Terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama. Gambar dibawah ini merupakan RMS percepatan yang dialami oleh bagian tubuh pengemudi pada variasi kecepatan yang dilakukan selama simulasi:



Gambar 5.16 Grafik Nilai RMS Percepatan Bagian Tubuh Pengemudi Untuk Kecepatan yang Bervariasi

Gambar 5.16 merupakan RMS percepatan hasil simulasi yang dialami tubuh pengemudi. Pada kecepatan 40 km/jam RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi berada pada kondisi sedikit tidak nyaman. Berdasarkan ISO 2631 RMS percepatan hasil simulasi pengemudi pada kecepatan 70 km/jam berada pada kondisi tidak nyaman. Pada kecepatan 100 km/jam RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi berada pada kondisi sangat tidak nyaman.

## 5.2 Respon Pengemudi dengan Pemodelan *Frequency Response*

Diagram Bode atau diagram logaritmik merupakan suatu fungsi dengan input sinusoidal yang terdiri dari dua buah grafik yang terpisah. Satu merupakan diagram dari logaritma besar fungsi input sinusoida (*magnitude*), dan yang satunya lagi merupakan diagram sudut fasa. Keduanya digambar terhadap frekuensi dalam skala logaritmik. Besar nilai yang akan kita cari dari grafik *magnitude* (dB) adalah nilai gain (*G*). Dengan perumusan:

$$\text{magnitude} = 20 \log G$$

$$G = 10^{\left(\frac{\text{magnitude}}{20}\right)}$$

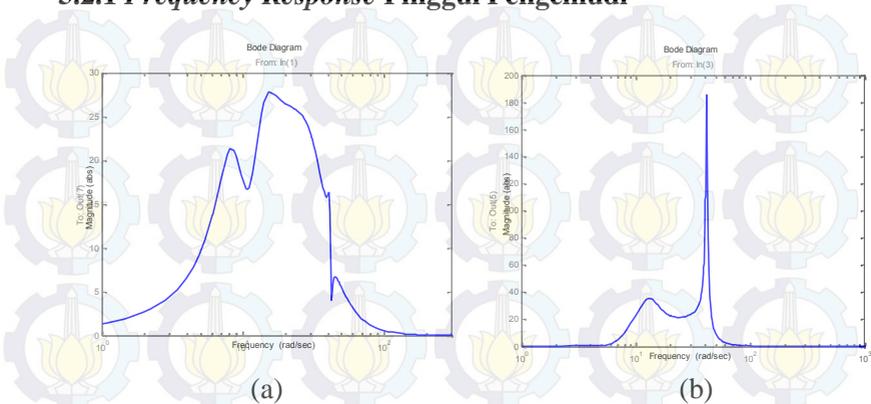
Sehingga kita dapat menanalisa pengaruh dari perubahan frekuensi input terhadap gain (*G*). Sedangkan grafik sudut fasa digunakan untuk mengetahui keterlambatan dari respon.

Sebagai data acuan bahwa frekuensi input menggambarkan perubahan kecepatan kendaraan (*v*) yang melintasi jalan bergelombang dengan panjang gelombang ( $\lambda$ ) 20 m. Dimana perhitungan frekuensi input adalah:

$$\omega = 2\pi \frac{v}{\lambda}$$

Range frekuensi yang digunakan hanya sampai 30 rad/s atau sama dengan 103 km/jam. Hal ini digunakan karena kecepatan maksimum kendaraan adalah sekitar 100 km/jam. Kecepatan 40 km/jam setara dengan frekuensi ( $\omega$ ) 3,49 rad/s, 60 km/jam setara  $\omega = 5,237$  rad/s, dan kecepatan 100 km/jam setara dengan  $\omega = 8,727$  rad/s.

### 5.2.1 Frequency Response Pinggul Pengemudi



Gambar 5. 17 Grafik *Frequency Response* Percepatan Pinggul Pengemudi akibat:

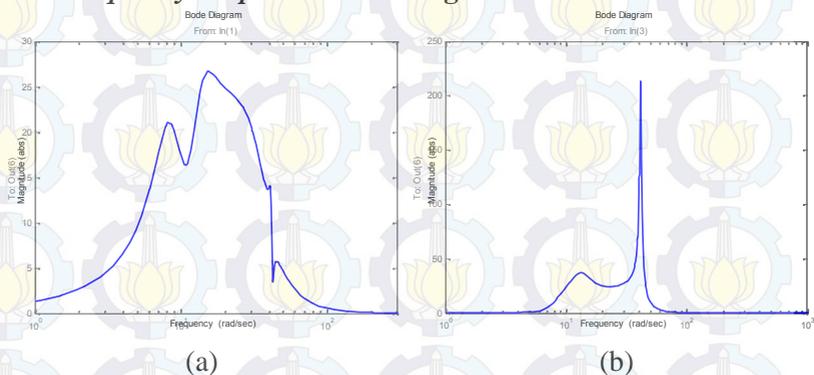
(a) Eksitasi Roda Depan (b) Eksitasi Roda Belakang

Gambar 5.17 (a) merupakan respon frekuensi percepatan hasil simulasi yang terjadi pada pinggul pengemudi ketika roda depan diberi eksitasi input berupa perpindahan. Pada gambar 5.17 (a) terlihat bahwa terdapat 4 puncak. Puncak pertama merupakan puncak yang menunjukkan frekuensi natural dari dada pengemudi yaitu sebesar 8,06 rad/s dengan perbesaran 20,6. Untuk puncak yang kedua merupakan frekuensi natural dari kepala pengemudi yaitu sebesar 15,8 rad/s dengan perbesaran 25,3. Untuk puncak yang ketiga merupakan frekuensi natural dari simpangan *chassis* kendaraan yaitu 40,2 rad/s dengan perbesaran 12,2. Puncak yang keempat adalah frekuensi natural dari pinggul yaitu 45,2 rad/s dengan perbesaran 5,1. Dapat disimpulkan bahwa ketika dada, kepala, simpangan *chassis* kendaraan, dan pinggul telah mencapai frekuensi natural tersebut maka pinggul akan merasakan getaran yang berlebihan sehingga pengemudi akan merasa tidak nyaman.

Gambar 5.17 (b) merupakan respon frekuensi percepatan hasil simulasi yang terjadi pada pinggul pengemudi akibat roda

belakang diberi eksitasi input berupa perpindahan. Pada gambar 5.17 (b) terlihat bahwa terdapat 2 puncak. Puncak pertama merupakan puncak yang menunjukkan frekuensi natural dari kepala pengemudi yaitu sebesar 12,7 rad/s dengan perbesaran 35,4. Untuk puncak yang kedua merupakan frekuensi natural dari simpangan *chassis* kendaraan yaitu sebesar 41,5 rad/s dengan perbesaran 186. Dapat disimpulkan bahwa ketika kepala dan simpangan *chassis* kendaraan telah mencapai frekuensi natural tersebut maka pinggul akan merasakan getaran yang berlebihan sehingga pengemudi akan merasa tidak nyaman.

### 5.2.2 Frequency Response Perut Pengemudi



Gambar 5. 18 Grafik *Frequency Response* Percepatan Perut Pengemudi akibat:

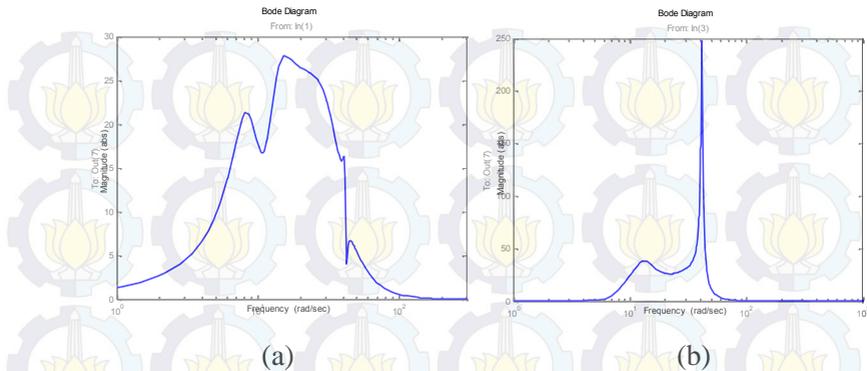
(a) Eksitasi Roda Depan (b) Eksitasi Roda Belakang

Gambar 5.18 (a) merupakan respon frekuensi percepatan hasil simulasi yang terjadi pada perut pengemudi ketika roda depan diberi eksitasi input berupa perpindahan. Pada gambar 5.18 (a) terlihat bahwa terdapat 4 puncak. Puncak pertama merupakan puncak yang menunjukkan frekuensi natural dari dada pengemudi yaitu sebesar 8,33 rad/s dengan perbesaran 21. Untuk puncak yang kedua merupakan frekuensi natural dari kepala pengemudi yaitu

sebesar 15,5 rad/s dengan perbesaran 26,7. Untuk puncak yang ketiga merupakan frekuensi natural dari simpangan *chassis* kendaraan yaitu 40,6 rad/s dengan perbesaran 13,9. Puncak yang keempat adalah frekuensi natural dari pinggul yaitu 48,8 rad/s dengan perbesaran 4,98. Dapat disimpulkan bahwa ketika dada, kepala, simpangan *chassis* kendaraan, dan pinggul telah mencapai frekuensi natural tersebut maka perut akan merasakan getaran yang berlebihan sehingga pengemudi akan merasa tidak nyaman.

Gambar 5.18 (b) merupakan respon frekuensi percepatan hasil simulasi yang terjadi pada perut pengemudi akibat roda belakang diberi eksitasi input berupa perpindahan. Pada gambar 5.18 (b) terlihat bahwa terdapat 2 puncak. Puncak pertama merupakan puncak yang menunjukkan frekuensi natural dari kepala pengemudi yaitu sebesar 12,8 rad/s dengan perbesaran 37,1. Untuk puncak yang kedua merupakan frekuensi natural dari simpangan *chassis* kendaraan yaitu sebesar 41,4 rad/s dengan perbesaran 213. Dapat disimpulkan bahwa ketika kepala dan *chassis* kendaraan telah mencapai frekuensi natural tersebut maka perut akan merasakan getaran yang berlebihan sehingga pengemudi akan merasa tidak nyaman.

### 5.2.3 Frequency Response Dada Pengemudi



Gambar 5. 19 Grafik *Frequency Response* Percepatan Dada Pengemudi akibat:

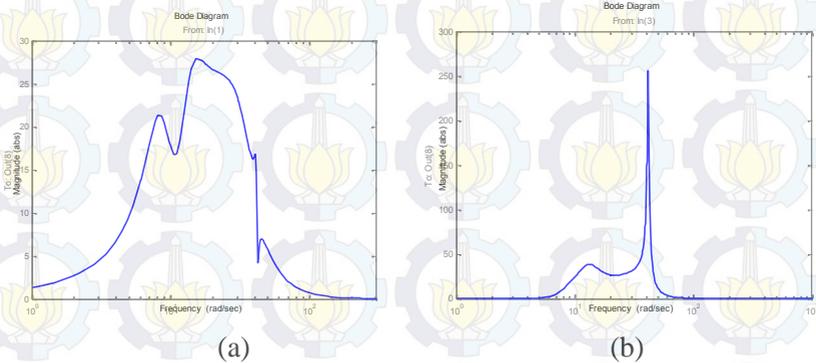
(a) Eksitasi Roda Depan (b) Eksitasi Roda Belakang

Gambar 5.19 (a) merupakan respon frekuensi percepatan hasil simulasi yang terjadi pada dada pengemudi ketika roda depan diberi eksitasi input berupa perpindahan. Pada gambar 5.19 (a) terlihat bahwa terdapat 4 puncak. Puncak pertama merupakan puncak yang menunjukkan frekuensi natural dari dada pengemudi yaitu sebesar 8,12 rad/s dengan perbesaran 21,3. Untuk puncak yang kedua merupakan frekuensi natural dari kepala pengemudi yaitu sebesar 15,3 rad/s dengan perbesaran 27,8. Untuk puncak yang ketiga merupakan frekuensi natural dari simpangan *chassis* kendaraan yaitu 40,5 rad/s dengan perbesaran 16,3. Puncak yang keempat adalah frekuensi natural dari pinggul yaitu 45 rad/s dengan perbesaran 6,67. Dapat disimpulkan bahwa ketika dada, kepala, simpangan *chassis* kendaraan, dan pinggul telah mencapai frekuensi natural tersebut maka dada akan merasakan getran yang berlebihan sehingga pengemudi akan merasa tidak nyaman.

Gambar 5.19 (b) merupakan respon frekuensi percepatan hasil simulasi yang terjadi pada dada pengemudi akibat roda belakang diberi eksitasi input berupa perpindahan. Pada gambar

5.19 (b) terlihat bahwa terdapat 2 puncak. Puncak pertama merupakan puncak yang menunjukkan frekuensi natural dari kepala pengemudi yaitu sebesar 13,5 rad/s dengan perbesaran 38,4. Untuk puncak yang kedua merupakan frekuensi natural dari simpangan *chassis* kendaraan yaitu sebesar 41,4 rad/s dengan perbesaran 248. Dapat disimpulkan bahwa ketika kepala dan *chassis* kendaraan telah mencapai frekuensi natural tersebut maka dada akan merasakan getaran yang berlebihan sehingga pengemudi akan merasa tidak nyaman.

### 5.2.4 Frequency Response Kepala Pengemudi



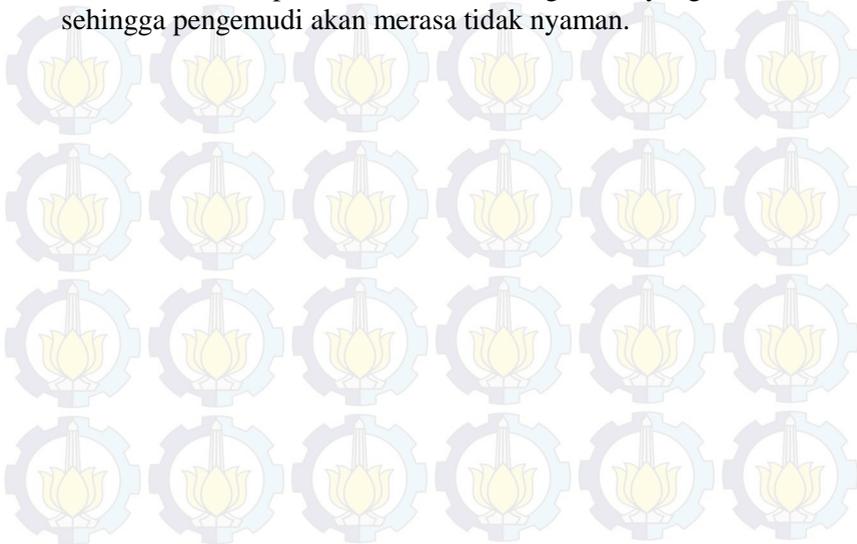
Gambar 5. 20 Grafik *Frequency Response* Percepatan Kepala Pengemudi akibat:

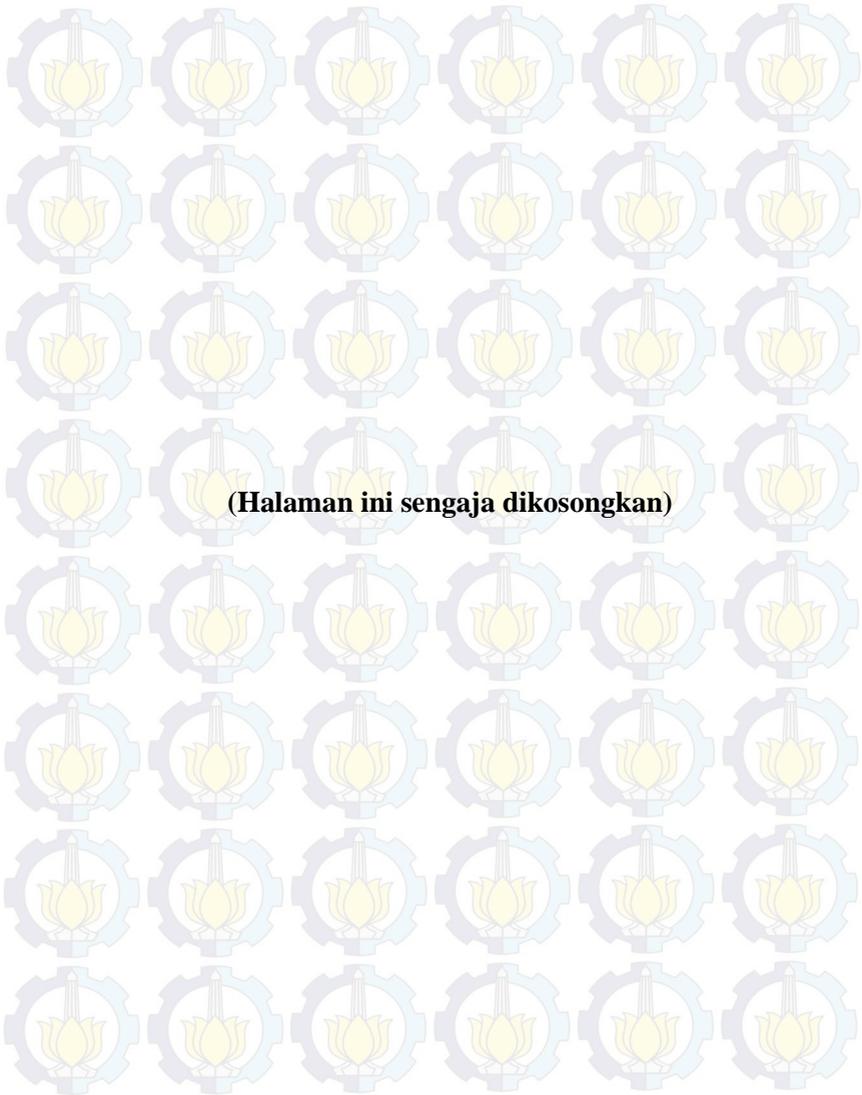
(a) Eksitasi Roda Depan (b) Eksitasi Roda Belakang

Gambar 5.20 (a) merupakan respon frekuensi percepatan hasil simulasi yang terjadi pada kepala pengemudi ketika roda depan diberi eksitasi input berupa perpindahan. Pada gambar 5.20 (a) terlihat bahwa terdapat 4 puncak. Puncak pertama merupakan puncak yang menunjukkan frekuensi natural dari dada pengemudi yaitu sebesar 8,33 rad/s dengan perbesaran 21,3. Untuk puncak yang kedua merupakan frekuensi natural dari kepala pengemudi yaitu sebesar 15,3 rad/s dengan perbesaran 28. Untuk puncak yang

ketiga merupakan frekuensi natural dari simpangan *chassis* kendaraan yaitu 40,5 rad/s dengan perbesaran 16,8. Puncak yang keempat adalah frekuensi natural dari pinggul yaitu 46,2 rad/s dengan perbesaran 6,85. Dapat disimpulkan bahwa ketika dada, kepala, simpangan *chassis* kendaraan, dan pinggul telah mencapai frekuensi natural tersebut maka kepala akan merasakan getaran yang berlebihan sehingga pengemudi akan merasa tidak nyaman.

Gambar 5.20 (b) merupakan respon frekuensi percepatan hasil simulasi yang terjadi pada kepala pengemudi akibat roda belakang diberi eksitasi input berupa perpindahan. Pada gambar 5.20 (b) terlihat bahwa terdapat 2 puncak. Puncak pertama merupakan puncak yang menunjukkan frekuensi natural dari kepala pengemudi yaitu sebesar 13,2 rad/s dengan perbesaran 38,5. Untuk puncak yang kedua merupakan frekuensi natural dari simpangan *chassis* kendaraan yaitu sebesar 41,4 rad/s dengan perbesaran 256.. Dapat disimpulkan bahwa ketika kepala dan simpangan *chassis* kendaraan telah mencapai frekuensi natural tersebut maka kepala akan merasakan getaran yang berlebihan sehingga pengemudi akan merasa tidak nyaman.





## BAB VI PENUTUP

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis terhadap *time response* yaitu dengan input step dan harmonik dengan variasi kecepatan dan amplitudo serta *frequency response*, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada input step sebesar 0,1 m didapatkan respon transien dari pengemudi berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan pada bagian kepala adalah 0,185 m, 0,815 m/s, 8,945 m/s<sup>2</sup>. Untuk bagian dada adalah 0,184 m, 0,81 m/s, dan 8,948 m/s<sup>2</sup>. Pada bagian perut adalah 0,183 m, 0,792 m/s, dan 8,1 m/s<sup>2</sup>. Pada bagian pinggul adalah 0,182 m, 0,76 m/s, dan 7,45 m/s<sup>2</sup>. Waktu yang diperlukan oleh tubuh pengemudi untuk mencapai kondisi stabil adalah 2 detik.
2. Pada input harmonik dengan amplitudo 0,01 m dengan kecepatan 40 km/jam RMS percepatan manusia pada bagian kepala sebesar 0,1799 m/s<sup>2</sup>, dada adalah 0,1811 m/s<sup>2</sup>, perut adalah 0,171 m/s<sup>2</sup>, dan pinggul adalah 0,1824 m/s<sup>2</sup>. Pada kecepatan 100 km/jam RMS percepatan manusia pada bagian kepala sebesar 0,4844 m/s<sup>2</sup>, dada adalah 0,4853 m/s<sup>2</sup>, perut adalah 0,4669 m/s<sup>2</sup>, dan pinggul adalah 0,474 m/s<sup>2</sup>. Berdasarkan ISO 2631 RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi pada kecepatan 40 km/jam berada dalam kondisi tidak ada keluhan sedangkan untuk kecepatan 100 km/jam pengemudi berada pada kondisi sedikit tidak nyaman.
3. Pada input harmonik dengan amplitudo 0,03 m dengan kecepatan 40 km/jam RMS percepatan manusia pada bagian kepala sebesar 0,5398 m/s<sup>2</sup>, dada adalah 0,5431 m/s<sup>2</sup>, perut adalah 0,5144 m/s<sup>2</sup>, dan pinggul adalah 0,5466 m/s<sup>2</sup>. Pada kecepatan 100 km/jam RMS percepatan manusia pada bagian kepala sebesar 1,454 m/s<sup>2</sup>, dada adalah 1,447 m/s<sup>2</sup>, perut adalah 1,074 m/s<sup>2</sup>, dan pinggul

adalah  $1,395 \text{ m/s}^2$ . Pada kecepatan 40 km/jam RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi berada pada kondisi sedikit tidak nyaman sedangkan untuk kecepatan 100 km/jam RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi berada pada kondisi sangat tidak nyaman.

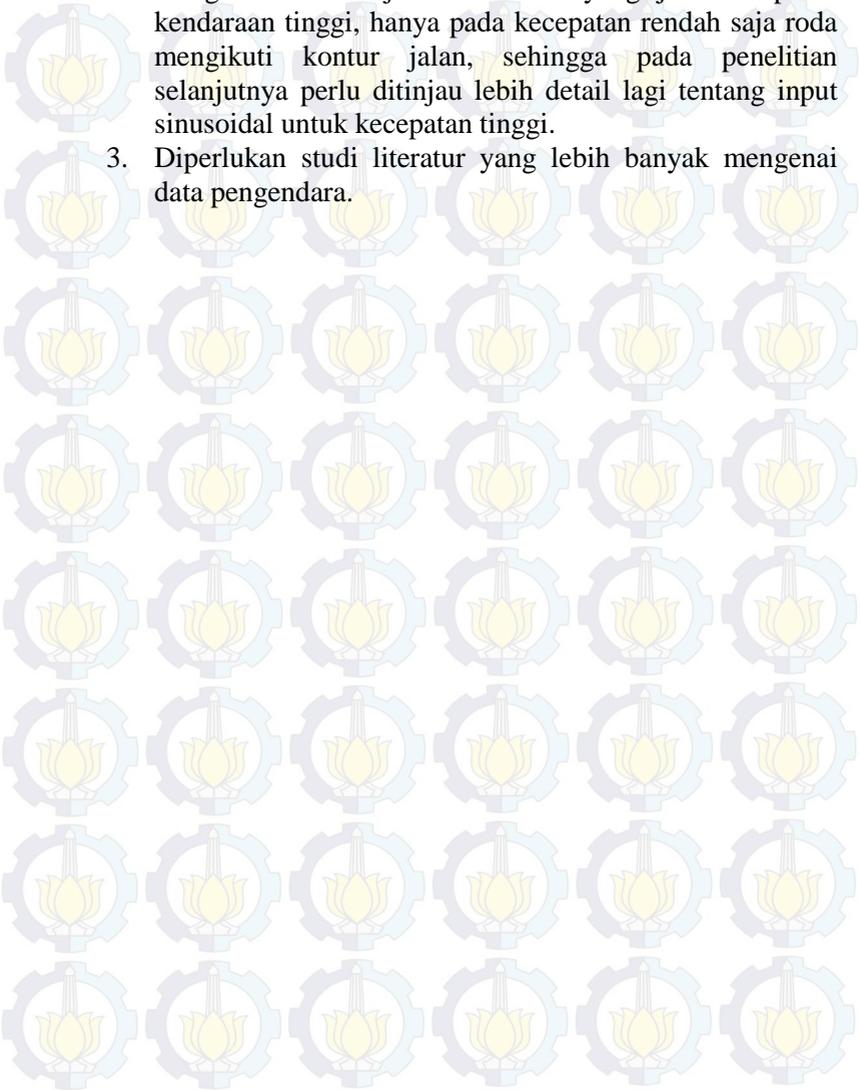
4. Pada grafik percepatan *frequency response* akibat eksitasi perpindahan pada roda depan terhadap pinggul pengemudi diketahui frekuensi natural dari kepala pengemudi yaitu sebesar 15,8 rad/s dengan perbesaran 25,3. Frekuensi natural dari simpangan *chassis* kendaraan yaitu 40,2 rad/s dengan perbesaran 12,2. Frekuensi natural dari pinggul yaitu 45,2 rad/s dengan perbesaran 5,1. Dapat disimpulkan bahwa ketika dada, kepala, *chassis* kendaraan, dan pinggul telah mencapai frekuensi natural tersebut maka pinggul akan merasakan getaran yang berlebihan sehingga pengemudi akan merasa tidak nyaman.
5. Pada grafik percepatan *frequency response* akibat eksitasi perpindahan pada roda belakang terhadap pinggul pengemudi diketahui frekuensi natural dari kepala pengemudi yaitu sebesar 12,7 rad/s dengan perbesaran 35,4. Frekuensi natural dari simpangan *chassis* kendaraan yaitu sebesar 41,5 rad/s dengan perbesaran 186. Dapat disimpulkan bahwa ketika kepala dan *chassis* kendaraan telah mencapai frekuensi natural tersebut maka pinggul akan merasakan getaran yang berlebihan sehingga pengemudi akan merasa tidak nyaman.

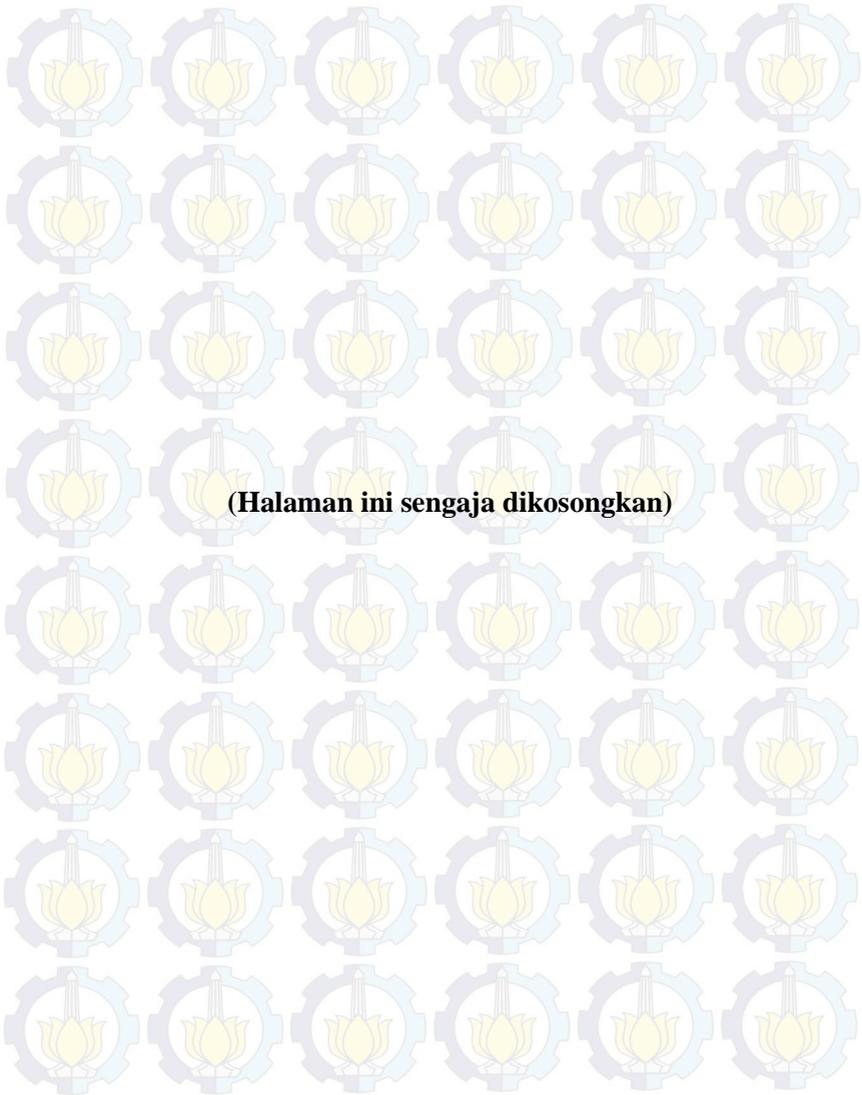
### 6.1 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan beberapa saran untuk pengembangan dalam penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Disarankan untuk penelitian selanjutnya harus diadakan uji eksperimen untuk validasi model matematis.

2. Pada input sinusoidal, pada kenyataannya roda tidak mengikuti kontur jalan atau melayang jika kecepatan kendaraan tinggi, hanya pada kecepatan rendah saja roda mengikuti kontur jalan, sehingga pada penelitian selanjutnya perlu ditinjau lebih detail lagi tentang input sinusoidal untuk kecepatan tinggi.
3. Diperlukan studi literatur yang lebih banyak mengenai data pengendara.





**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## DAFTAR PUSTAKA

- A, Mostafa dan Abbas, W. 2011. **Prediction The Biodynamic Response Of The Seated Human Body Using Artificial Intelligence Technique**. Cairo University : Mesir.
- Dumitriu, M d lina. 2012. **Influence Of The Suspension Damping On Ride Comfort Of Passenger Railway Vehicles**. University Politehnica of Bucharest, Rumania
- Rao, Singiresu S. 2010. **Mechanical Vibrations (5th Edition)**. N.J.:Prentice Hall.
- Sekulic, Dragan dan Devodic, Vlastimir. 2013. **The Effect Of Stiffness And Damping Of The Suspension System Elements On The Optimisation Of The Vibrational Behaviour Of A Bus**. Belgrade, Serbia
- Sekuli , Dragan, Vlastimir, Dedovi dan Sr an Rusov. 2011. **Effect Of Shock Vibrations Due To Speed Control Humps To The Health Of City Bus Drivers**. Beograd, Serbia
- Sekulic, Dragan dan Vlastimir Dedovic, dkk. 2013. **Analysis of Vibration Effects on the Comfort of Intercity Bus Users by Oscillatory Model with Ten Degrees of Freedom**. Belgrade, Serbia
- Sutantra, I Nyoman dan Sampurno, Bambang. 2010. **Teknologi Otomotif (Edisi Kedua)**. Surabaya: Guna Widya.



**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## LAMPIRAN

### A. M-File Matlab

```
%PEMODELAN MATEMATIS SETENGAH KENDARAAN ANGKUT MASSAL (BUS) DENGAN PENGEMUDINYA
mbf=745; %massa ban depan (kg)
mbr=1355; %massa ban belakang (kg)
mc=11900; %massa kendaraan (kg)
mp=13.65; %massa pinggul (kg)
me=9.15; %massa perut (kg)
md=30.15; %massa dada (kg)
mk=5.625; %massa kepala (kg)
kbf=1000000; %konstanta kekakuan ban depan (N/m)
kbr=2000000; %konstanta kekakuan ban belakang (N/m)
ksf=350000; %konstanta kekakuan suspensi depan (N/m)
ksr=811250; %konstanta kekakuan suspensi belakang (N/m)
kp=90000; %konstanta kekakuan pinggul (N/m)
ke=162800; %konstanta kekakuan perut (N/m)
kd=183000; %konstanta kekakuan dada (N/m)
kk=310000; %konstanta kekakuan kepala (N/m)
cbf=0; %konstanta redaman ban depan (N.s/m)
cbr=0; %konstanta redaman ban belakang (N.s/m)
csf=40000; %konstanta redaman suspensi depan (N.s/m)
csr=45973; %konstanta redaman suspensi belakang (N.s/m)
ck=400; %konstanta redaman kepala (N.s/m)
cd=4750; %konstanta redaman dada (N.s/m)
ce=4585; %konstanta redaman perut (N.s/m)
cp=2064; %konstanta redaman pinggul (N.s/m)
J=50000; %momen inerti kendaraan (N.s/m)
lf=3.12; %jarak ban depan dengan COG (N.s/m)
lr=2.53; %jarak ban belakang dengan COG (N.s/m)
lm=4.62; %jarak pengemudi dengan COG (N.s/m)

%matriks state space
a91=(-(kbf+ksf))/mbf
a93=(ksf)/mbf;
a94=(ksf*lf)/mbf;
a99= (-cbf-csf)/mbf;
a911=(csf)/mbf;
a912=(csf*lf)/mbf;
a102=(-kbr-ksr)/mbr;
a103=(ksr)/mbr;
a104=(-ksr*lr)/mbr;
a1010=(-cbr-csr)/mbr;
a1011=(csr)/mbr;
a1012=(-csr*lr)/mbr;
a111=(ksf)/mc;
```

$a_{112} = (k_{sr}) / m_c;$   
 $a_{113} = (-k_{sf} - k_{sr} - k_p) / m_c;$   
 $a_{114} = ((-k_{sf} * l_f) + (k_{sr} * l_r) + (-k_p * l_m)) / m_c;$   
 $a_{115} = (k_p) / m_c;$   
 $a_{119} = (c_{sf}) / m_c;$   
 $a_{1110} = (c_{sr}) / m_c;$   
 $a_{1111} = (-c_{sf} - c_{sr} - c_p) / m_c;$   
 $a_{1112} = ((-c_{sf} * l_f) + (c_{sr} * l_r) + (-c_p * l_m)) / m_c;$   
 $a_{1113} = (c_p) / m_c;$   
 $a_{121} = (k_{sf} * l_f) / J;$   
 $a_{122} = (-k_{sr} * l_r) / J;$   
 $a_{123} = ((-k_{sf} * l_f) + (k_{sr} * l_r) - (k_p * l_m)) / J;$   
 $a_{124} = ((-k_{sf} * l_f * l_f) + (-k_{sr} * l_r * l_r) + (-k_p * l_m * l_m)) / J;$   
 $a_{125} = (k_p * l_m) / J;$   
 $a_{129} = (c_{sf} * l_f) / J;$   
 $a_{1210} = (-c_{sr} * l_r) / J;$   
 $a_{1211} = ((-c_{sf} * l_f) + (c_{sr} * l_r) - (c_p * l_m)) / J;$   
 $a_{1212} = ((-c_{sf} * l_f * l_f) - (c_{sr} * l_r * l_r) - (c_p * l_m * l_m)) / J;$   
 $a_{1213} = (c_p * l_m) / J;$   
 $a_{133} = (k_p) / m_p;$   
 $a_{134} = (k_p * l_m) / m_p;$   
 $a_{135} = (-k_p - k_e) / m_p;$   
 $a_{136} = (k_e) / m_p;$   
 $a_{1311} = (c_p) / m_p;$   
 $a_{1312} = (c_p * l_m) / m_p;$   
 $a_{1313} = (-c_p - c_e) / m_p;$   
 $a_{1314} = (c_e) / m_p;$   
 $a_{145} = (k_e) / m_e;$   
 $a_{146} = (-k_d - k_e) / m_e;$   
 $a_{147} = (k_d) / m_e;$   
 $a_{1413} = (c_e) / m_e;$   
 $a_{1414} = (-c_d - c_e) / m_e;$   
 $a_{1415} = (c_d) / m_e;$   
 $a_{156} = (k_d) / m_d;$   
 $a_{157} = (-k_d - k_k) / m_d;$   
 $a_{158} = (k_k) / m_d;$   
 $a_{1514} = (c_d) / m_d;$   
 $a_{1515} = (-c_d - c_k) / m_d;$   
 $a_{1516} = (c_k) / m_d;$   
 $a_{167} = (k_k) / m_k;$

```

a168=(-kk)/mk;
a1615=(ck)/mk;
a1616=(-ck)/mk;

```

```

A=[0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1;
a91 0 a93 a94 0 0 0 0 a99 0 a911 a912 0 0 0 0 0;
0 a102 a103 a104 0 0 0 0 0 a110 a1011 a1012 0 0 0 0;
a111 a112 a113 a114 a115 0 0 0 a119 a1110 a1111 a1112 a1113 0 0 0;
a121 a122 a123 a124 a125 0 0 0 a129 a1210 a1211 a1212 a1213 0 0 0;
0 0 a133 a134 a135 a136 0 0 0 0 a1311 a1312 a1313 a1314 0 0;
0 0 0 0 a145 a146 a147 0 0 0 0 0 a1413 a1414 a1415 0;
0 0 0 0 0 a156 a157 a158 0 0 0 0 0 a1514 a1515 a1516;
0 0 0 0 0 0 a167 a168 0 0 0 0 0 0 a1615 a1616];

```

```

%matriks input
b91=(kbf)/mbf;
b92=(cbf)/mbf;
b103=(kbr)/mbr;
b104=(cbr)/mbr;

```

```

C=[0 0 0 0;
0 0 0 0;
0 0 0 0;|
0 0 0 0;
0 0 0 0;
0 0 0 0;
0 0 0 0;
0 0 0 0;
b91 b92 0 0;
0 0 b103 b104;
0 0 0 0;
0 0 0 0;
0 0 0 0;
0 0 0 0;
0 0 0 0];

```

`%matriks identitas`

`C=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0;`

`0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0;`

`0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;`

`0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0;`

`0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;`

`0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0;`

`0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0;`

`0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1];`

`D=[0 0 0 0;`

`0 0 0 0;`

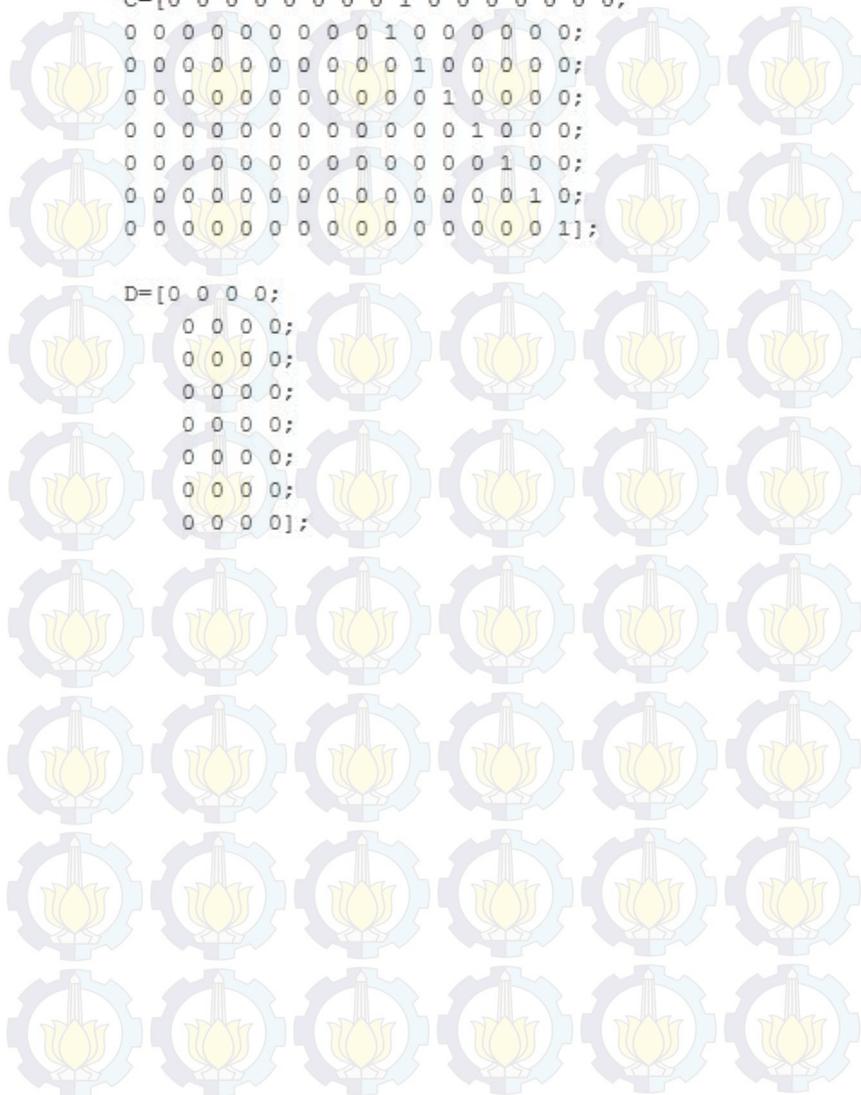
`0 0 0 0;`

`0 0 0 0;`

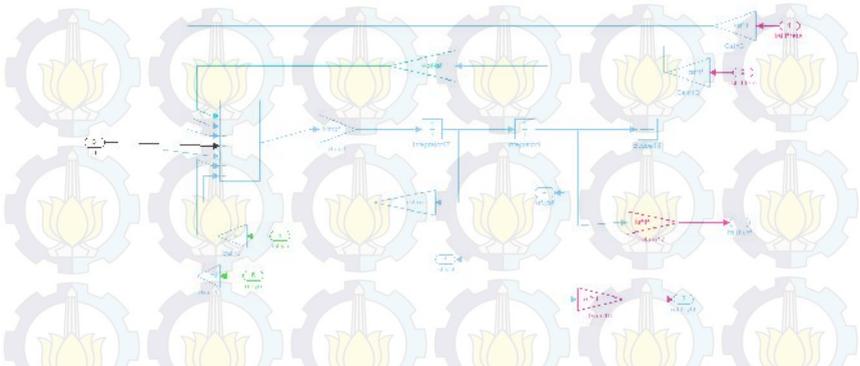
`0 0 0 0;`

`0 0 0 0;`

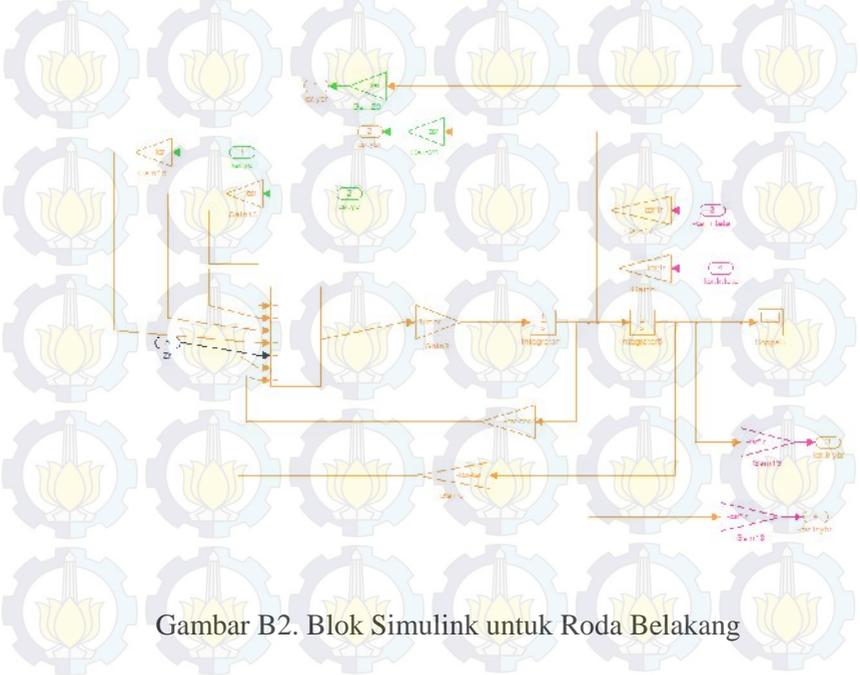
`0 0 0 0];`



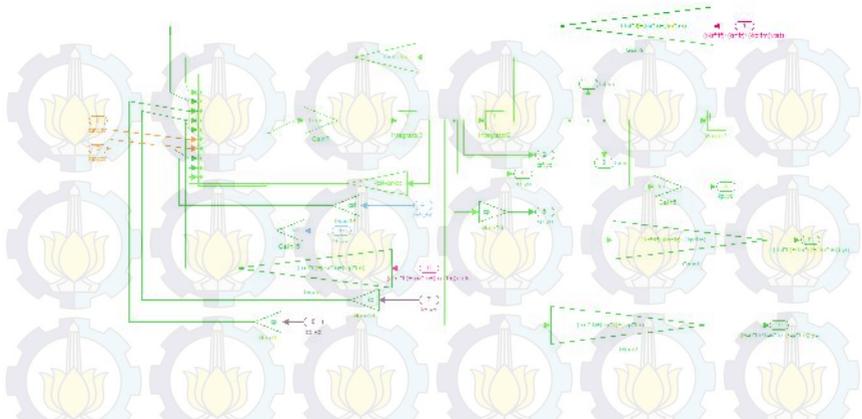
## B. Blok Simulink



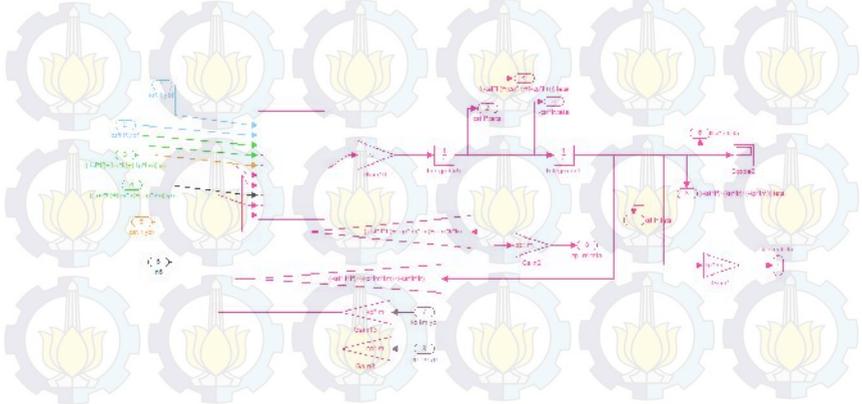
Gambar B1. Blok Simulink untuk Roda Depan



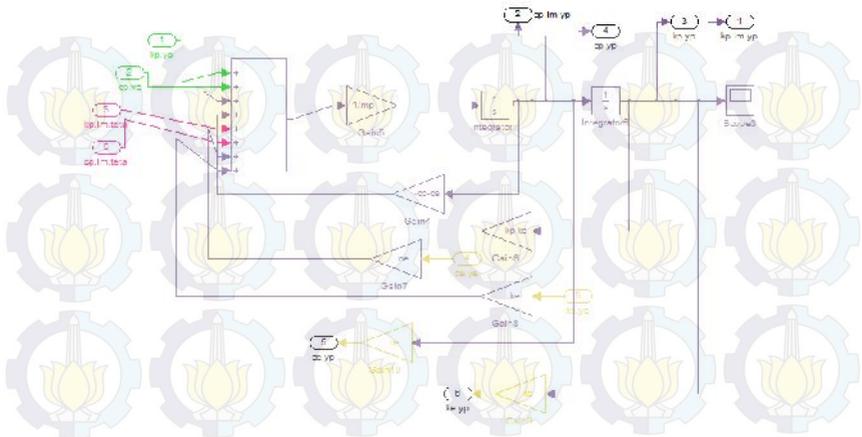
Gambar B2. Blok Simulink untuk Roda Belakang



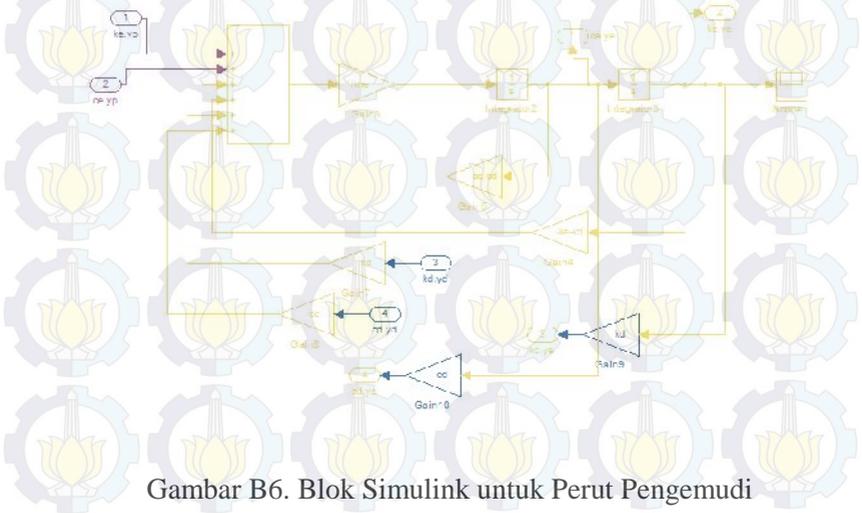
Gambar B3. Blok Simulink untuk Bodi Kendaraan



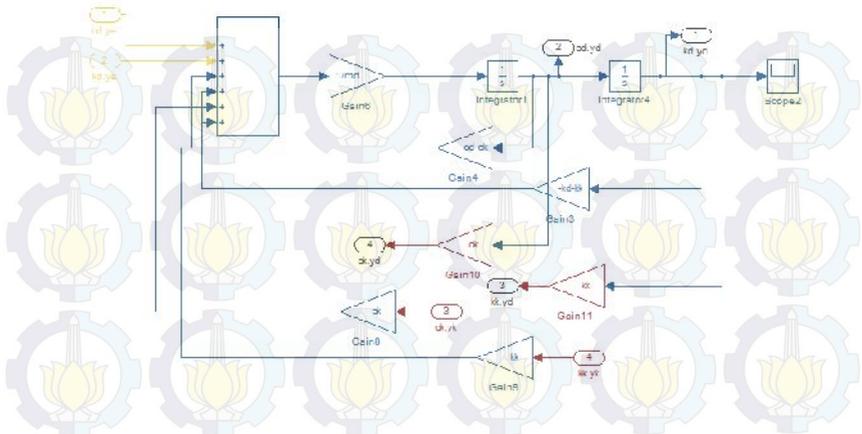
Gambar B4. Blok Simulink untuk Simpangan Bodi Kendaraan



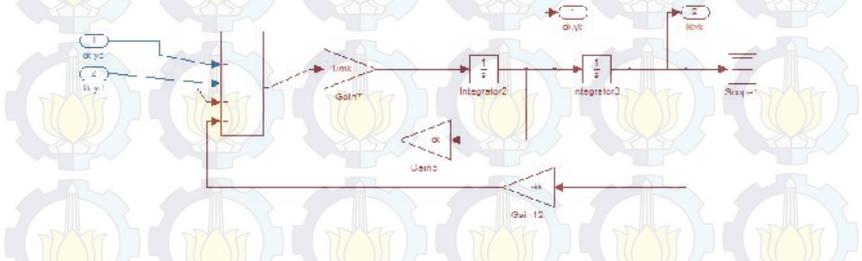
Gambar B5. Blok Simulink untuk Pinggul Pengemudi



Gambar B6. Blok Simulink untuk Perut Pengemudi



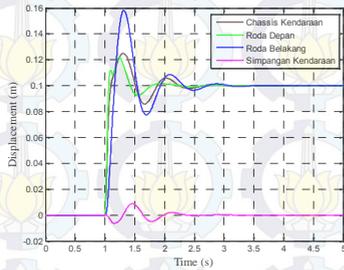
Gambar B7. Blok Simulink untuk Dada Pengemudi



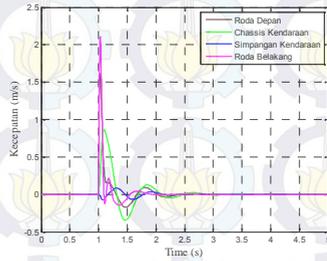
Gambar B8. Blok Simulink untuk Kepala Pengemudi

## C. Time Response Kendaraan

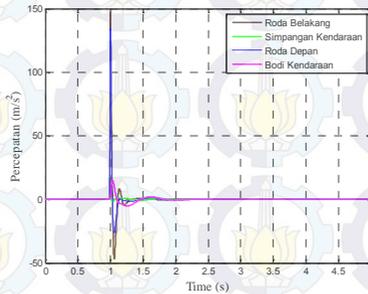
### 1. Grafik Respon dengan Input Step



(a)



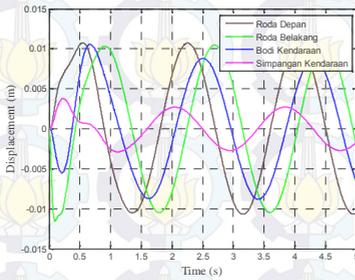
(b)



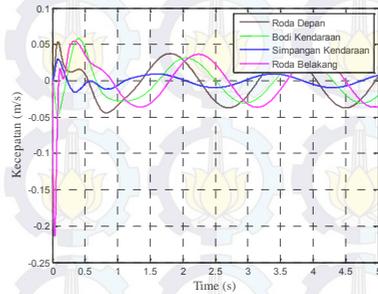
(c)

Gambar C1. Grafik *Time Response* Bodi Kendaraan dengan Input Step (a) Perpindahan (*Displacement*), (b) Kecepatan (*Velocity*), dan (c) Percepatan (*Acceleration*)

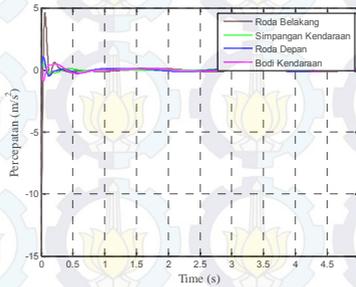
## 2. Grafik Respon dengan Input Sinusoidal (Amplitudo 1 cm)



(a)

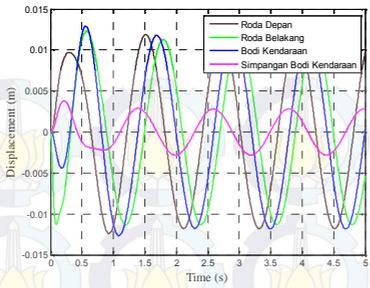


(b)

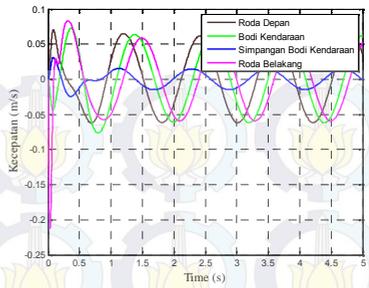


(c)

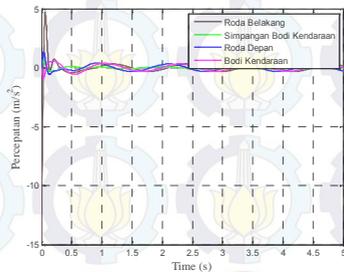
Gambar C2. Grafik *Time Response* Kendaraan dengan Input Sinusoidal kec.40 km/jam, (a). Perpindahan (*Displacement*), (b). Kecepatan (*Velocity*), (c). Percepatan (*Acceleration*)



(a)

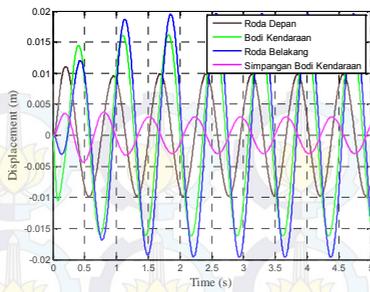


(b)

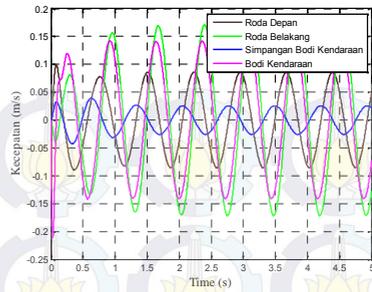


(c)

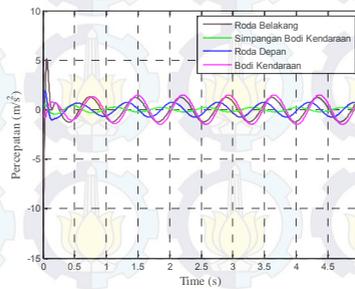
Gambar C3. Grafik *Time Response* Kendaraan dengan Input Sinusoidal kec.60 km/jam, (a). Perpindahan (*Displacement*), (b). Kecepatan (*Velocity*), (c). Percepatan (*Acceleration*)



(a)



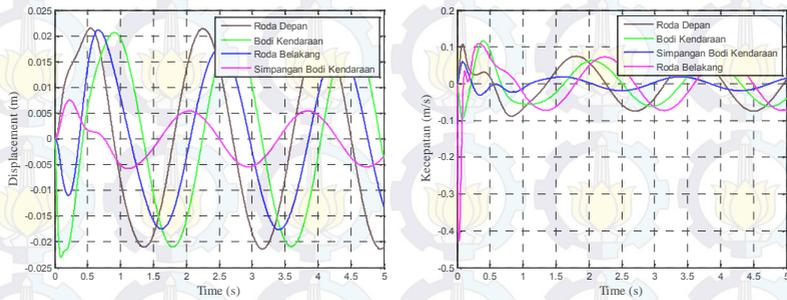
(b)



(c)

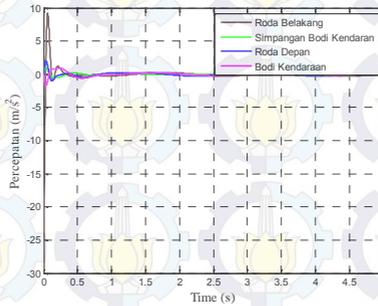
Gambar C4. Grafik *Time Response* Kendaraan dengan Input Sinusoidal kec.100 km/jam, (a). Perpindahan (*Displacement*), (b). Kecepatan (*Velocity*), (c). Percepatan (*Acceleration*)

## 2. Grafik Respon dengan Input Sinusoidal (Amplitudo 2 cm)



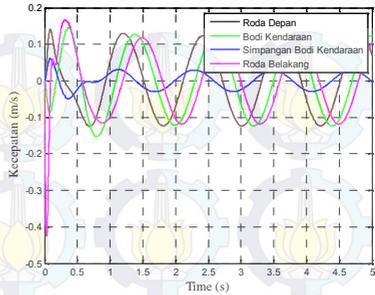
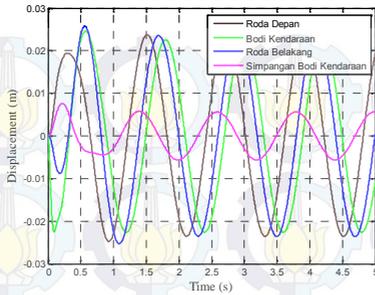
(a)

(b)



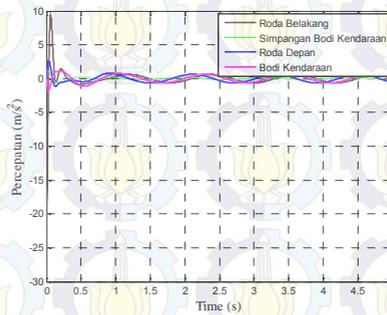
(c)

Gambar C5. Grafik *Time Response* Kendaraan dengan Input Sinusoidal kec.40 km/jam, (a). Perpindahan (*Displacement*), (b). Kecepatan (*Velocity*), (c). Percepatan (*Acceleration*)



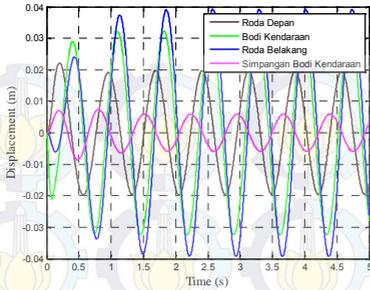
(a)

(b)

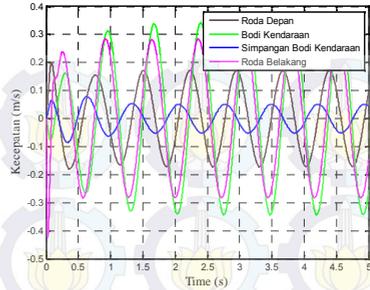


(c)

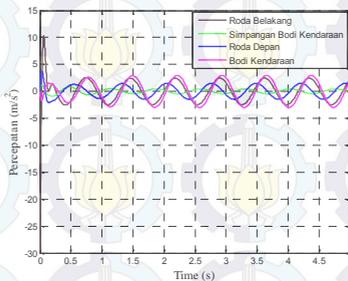
Gambar C6. Grafik *Time Response* Kendaraan dengan Input Sinusoidal kec.60 km/jam, (a). Perpindahan (*Displacement*), (b). Kecepatan (*Velocity*), (c). Percepatan (*Acceleration*)



(a)



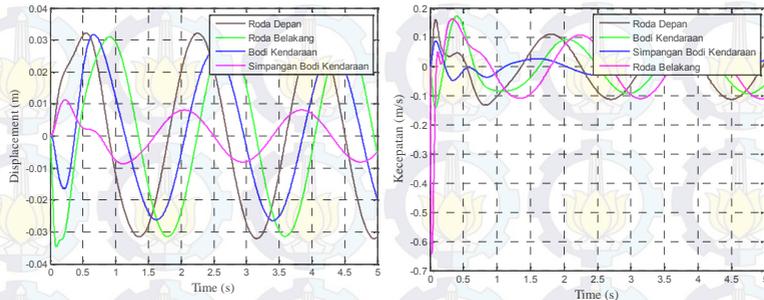
(b)



(c)

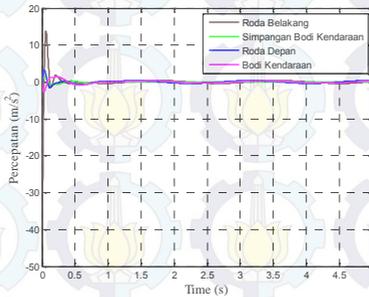
Gambar C7. Grafik *Time Response* Kendaraan dengan Input Sinusoidal kec.100 km/jam, (a). Perpindahan (*Displacement*), (b). Kecepatan (*Velocity*), (c). Percepatan (*Acceleration*)

### 3. Grafik Respon dengan Input Sinusoidal (Amplitudo 3 cm)



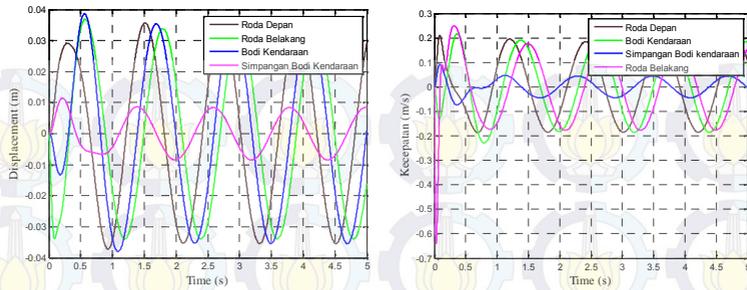
(a)

(b)



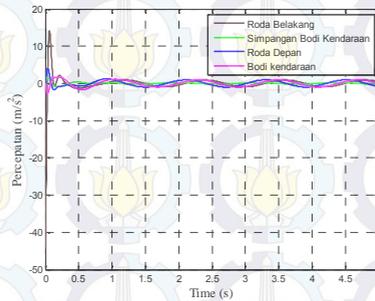
(c)

Gambar C8. Grafik *Time Response* Kendaraan dengan Input Sinusoidal kec.40 km/jam, (a). Perpindahan (*Displacement*), (b). Kecepatan (*Velocity*), (c). Percepatan (*Acceleration*)



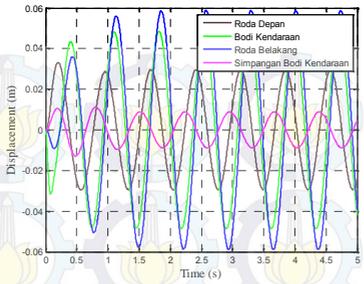
(a)

(b)

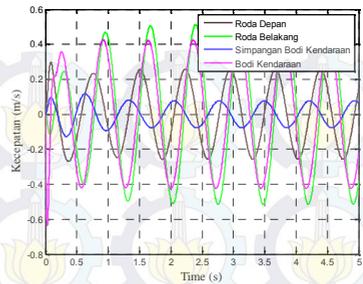


(c)

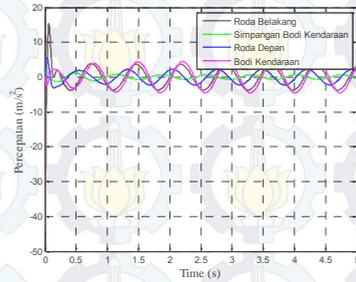
Gambar C8. Grafik *Time Response* Kendaraan dengan Input Sinusoidal kec.60 km/jam, (a). Perpindahan (*Displacement*), (b). Kecepatan (*Velocity*), (c). Percepatan (*Acceleration*)



(a)



(b)



(c)

Gambar C9. Grafik *Time Response* Kendaraan dengan Input Sinusoidal kec.60 km/jam, (a). Perpindahan (*Displacement*), (b). Kecepatan (*Velocity*), (c). Percepatan (*Acceleration*)

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kediri, 25 November 1991. Merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Dharma Wanita II, SDN Ngampel I (1998-2004), SMP Negeri 1 Papar (2004-2007) dan SMA Negeri 5 Surabaya (2007-2010). Sebelum lulus SMA, penulis mengikuti PMDK Bidik Misi pada tahun 2010 dan diterima pada pilihan pertama di Jurusan Teknik Mesin, FTI, ITS Surabaya. Penulis terdaftar dengan NRP. 2110 100 080.

Di Jurusan Teknik Mesin, penulis mengambil bidang studi Sistem Dinamis dan Vibrasi sebagai bahasan Tugas Akhir. Selama masa kuliah penulis telah mengikuti berbagai pelatihan dan workshop mengenai berbagai macam ketrampilan untuk meningkatkan soft skill. Penulis juga aktif dalam kegiatan di dalam lingkungan kampus seperti menjadi panitia kegiatan nasional, asisten praktikum laboratorium desain, asisten dosen pada berbagai mata kuliah dan menjadi anggota organisasi Himpunan Mahasiswa Mesin dan Pemandu Aktif LKMM. Di luar lingkungan kampus, Penulis aktif berpartisipasi dalam kegiatan-kegiatan yang berbasis sosial, pendidikan, kesehatan dan budaya.

Jika ada informasi, pertanyaan maupun saran yang ingin disampaikan kepada Penulis, silakan menyampaikan melalui email [navnava.amalia@gmail.com](mailto:navnava.amalia@gmail.com).