



TUGAS AKHIR – TM141585

**PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH
PERUBAHAN PARAMETER SISTEM SUSPENSI
HYDRO-PNEUMATIC TERHADAP GAYA REDAM
DAN GAYA PEGAS SERTA RESPON DINAMIS
MOBIL**

ISTINA RAHMAWATI
NRP. 2112 100 005

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

PROGRAM SARJANA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2016



FINAL PROJECT – TM141585

**MODELING AND ANALYSIS OF THE EFFECT OF
PARAMETER CHANGES IN THE HYDRO-
PNEUMATIC SUSPENSION SYSTEM TOWARDS
THE DAMPING FORCE AND THE SPRING FORCE
AND ALSO THE DYNAMIC RESPONSE OF THE
CAR**

ISTINA RAHMAWATI
NRP. 2112 100 005

Advisory Lecturer
Dr. Harus Laksana Guntur ST., M.Eng.

BACHELOR PROGRAM
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2016

LEMBAR PENGESAHAN

PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN PARAMETER SISTEM SUSPENSI *HYDRO-PNEUMATIC* TERHADAP GAYA REDAM DAN GAYA PEGAS SERTA RESPON DINAMIS MOBIL

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ISTINA RAHMAWATI

Nrp. 2112 100 005

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. Harus L. G., ST., M.Eng. (Pembimbing)
NIP. 197505111999031001
2. Prof. Ir. I Nyoman S., M.Sc., Ph.D. (Penguji I)
NIP. 195106051978031002
3. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. (Penguji II)
NIP. 197004121997032003
4. Moch. Solichin, ST., MT. (Penguji III)
NIP. 198908172015041003

SURABAYA

Juli 2016

**PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH
PERUBAHAN PARAMETER SISTEM SUSPENSI
HYDRO-PNEUMATIC TERHADAP GAYA REDAM
DAN GAYA PEGAS SERTA RESPON DINAMIS
MOBIL**

Nama Mahasiswa : Istina Rahmawati
NRP : 2112100005
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Harus Laksana Guntur ST.,
M.Eng.

Abstrak

Sistem suspensi yang biasa digunakan pada mobil adalah hydro-pneumatic shock absorber. Pada sistem suspensi hydro-pneumatic ini menggunakan minyak sebagai fluida kerja pada silinder hidrolis dan menggunakan gas nitrogen. Parameter-parameter yang ada pada sistem suspensi ini seperti dimensi shock absorber, tekanan dan volume fluida akan mempengaruhi karakteristik redaman dari sistem tersebut, serta dapat mempengaruhi respon dinamis dari mobil saat sistem suspensi tersebut dipasangkan pada mobil serta mempengaruhi gaya tekan dari ban pada mobil tersebut.

Dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan dan simulasi dari perubahan parameter yang ada pada sistem suspensi hydro-pneumatic terhadap gaya redam, gaya pegas dan respon dinamis dari kendaraan dan penumpang, serta gaya tekan (road holding) dari ban pada mobil. Tekanan awal gas (p_0) pada sistem suspensi hydro-pneumatic divariasikan sebesar 1,2 - 2 MPa pada volume awal gas konstan yaitu sebesar $8,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$. Volume awal gas (V_0) divariasikan sebesar $7,854 \times 10^{-5} - 9,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ pada tekanan awal gas konstan yaitu sebesar 1,6 MPa. Serta diameter orifice (D_o) divariasikan sebesar 0,001 m - 0,003 m dengan tekanan awal gas (p_0) dan volume awal gas (V_0) konstan yaitu sebesar 1,6 MPa dan $8,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$. Terdapat tiga jenis

gas yang digunakan pada simulasi sistem suspensi hydro-pneumatic yaitu nitrogen, karbondioksida, dan udara kering. Input yang digunakan pada tugas akhir ini adalah input sinusoidal dan bump modified.

Dari sistem suspensi hydro-pneumatic didapatkan hasil bahwa semakin kecil diameter orifice (D_o), maka gaya redam yang dihasilkan semakin besar. Semakin besar tekanan awal gas (p_0), maka gaya pegas yang dihasilkan semakin besar. Semakin besar volume awal gas (V_0) yang digunakan, maka gaya pegas yang dihasilkan semakin kecil. Pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi hydro-pneumatic untuk input bump modified dengan variasi jenis gas dan tekanan awal gas, respon kendaraan dan penumpang berturut-turut mencapai kondisi steady state kurang dari 2 detik dan 1,5 detik. Sedangkan untuk input sinusoidal dengan variasi jenis gas dan tekanan awal gas, respon kendaraan dan penumpang mencapai kondisi steady state kurang dari 3 detik. Dari kedua jenis variasi jenis gas dan tekanan awal gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai RMS untuk percepatan getaran penumpang adalah tidak ada keluhan (nyaman) apabila dibandingkan dengan standar ISO 2631 dan mencapai ketahanan lebih dari 24 jam. Untuk gaya tekan ban (road holding) untuk variasi jenis gas maupun tekanan gas bernilai positif, sehingga ban dalam posisi aman, yaitu masih menapak jalan.

Kata kunci : *hydro-pneumatic shock absorber, respon dinamis, sistem suspensi mobil, parameter, road holding.*

MODELING AND ANALYSIS OF THE EFFECT OF PARAMETER CHANGES IN THE HYDRO- PNEUMATIC SUSPENSION SYSTEM TOWARDS THE DAMPING FORCE AND THE SPRING FORCE AND ALSO THE DYNAMIC RESPONSE OF THE CAR

Name : Istina Rahmawati
NRP : 2112100005
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Advisory Lecturer : Dr. Harus Laksana Guntur ST.,
M.Eng.

Abstract

The suspension system are commonly used on the car is a hydro-pneumatic shock absorber. The hydro-pneumatic suspension system uses nitrogen gas as well as oil of the working fluid in the hydraulic cylinder. The parameters that exist in the suspension system such as the dimensions of the shock absorber, the pressure and volume of fluid, will affect the damping characteristics of the system and can affect the dynamic response of the car when suspension systems are mounted on the car and also influence the road holding of the tires on the car

In this final project, what will be carried out are modeling and simulation of parameter changes that exist on hydro-pneumatic suspension system to the damping force, spring force and dynamic response of the vehicle and passengers, as well as the road holding of the tires on the car. The initial gas pressure (p_0) in the hydro-pneumatic suspension was varied from 1.2 MPa until 2 MPa at a constant initial volume of gas that is equal to $8.854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$. The initial gas volume (V_0) was varied from $7.854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ until $9.854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ at a constant initial gas pressure that is equal to 1.6 MPa. And the orifice diameters (D_o) was varied 0,001 m until 0,003 m with initial gas pressure (p_0) and volume (V_0) constant that is equal to 1,6 MPa and 8.854×10^{-5}

m^3 . There are three types of gases used in the simulation of the hydro-pneumatic system, that is nitrogen, carbondioxide, and dry air. In this final project sinusoidal and bump modified input will be used.

From the hydro-pneumatic suspension system showed that the smaller the diameter of the orifice (D_o), then the damping force generated is even greater. The greater the initial pressure gas (p_0), the spring force generated is greater. The greater the volume of initial gas (V_o) is used, the resulting spring force gets smaller. On the quarter system car vehicle with the use of hydro-pneumatic suspension system for input bump modified with variations in the type of gas and initial pressure of gas, response vehicles and passenger successively reach steady state conditions is less than 2 seconds and 1.5 seconds. While for sinusoidal input with variations in the type of gas and the initial pressure of gas, response vehicles and passengers reach steady state conditions is less than 3 seconds. Of the two type variations in the gas and initial pressure of gas used in the simulation, the results of the RMS value for vibration acceleration of the passengers were no complaints (comfortable) when compared to the standard ISO 2631 and reached endurance over a 24-hour. For tire pressure force (road holding) known variations of type gas and the gas pressure has a positive value, so the tires in a safe position, which is still treading the path.

Keywords: hydro-pneumatic shock absorber, dynamic response, suspension car, parameter, road holding.

KATA PENGANTAR

Puji syukur dihaturkan kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, hanya karena tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orangtua penulis, Ibu Surati yang senantiasa mendoakan, membimbing dan memberikan semua hal terbaik untuk penulis. Terimakasih karena telah menjadi seorang ibu dan bapak terbaik bagi penulis. Bapak Sulardi, yang memberikan dorongan untuk penulis.
2. Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
3. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT., Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D., dan Moch. Solichin, St., MT., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis untuk Tugas Akhir ini.
4. Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc., selaku dosen wali yang telah memberikan bimbingan dan semangat selama penulis di bangku perkuliahan.
5. Segenap dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin FTI ITS, terima kasih atas ilmu yang disampaikan, semoga bermanfaat kedepannya bagi diri penulis dan bagi bangsa dan negara.
6. Alief Naufal yang telah memberikan motivasi, semangat, doa, perhatian, bantuan, dukungan dan memberikan hal yang terbaik bagi penulis, sehingga penulis dapat memberikan yang terbaik untuk Tugas Akhir ini.

7. Sahabat terbaik penulis, Clarissa Suroso, Yunita Hestiningrum, Nia Rosalina, Putri Wahyu Lestari yang senantiasa memberikan dukungan, semangat, dan bantuan bagi penulis.
8. Sahabat terbaik kontrakan, 'Girls Ex-Gatilab' Susi Nariati, Dewi Nur Rahmawati, Novi Anggraini, Retno Sri Wilujeng yang senantiasa memberikan semangat, dorongan, perhatian, wejangan berharga, dan motivasi bagi penulis.
9. Tim HLG, Adisylva, Firhan, Hasbulloh yang memberi bantuan dan mau berjuang bersama untuk lulus pada semester ini, serta Bella, Didin, dan Rai yang selalu memberi semangat.
10. Teman-teman LBMM 2012 'Budals' yang selalu memberikan motivasi dan semangat, khususnya Ayu, Betari, dan Piendra, serta Divisi KWU 2012, Fatih, Arizal, Gema yang selalu memberikan semangat bagi penulis.
11. Kawan-kawan Lab Vibrasi dan Desain yang telah memberi semangat dan dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
12. Keluarga besar M55 ITS yang selalu memberi dukungan satu sama lain untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
13. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Dengan segala keterbatasan kemampuan dan pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kontruksi Mobil	5
2.1.1 Sistem Suspensi Mobil	6
2.1.2 Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	9
2.1.3 Sistem Suspensi <i>Oleo-Pneumatic</i> pada Pesawat Boeing 747-400 Saat <i>Landing</i> dan <i>Take-Off</i>	13
2.2 Redaman.....	15
2.3 <i>Motion of Base</i>	17
2.4 Transmisibilitas Perpindahan (<i>Displacement Transmissibility</i>).....	18
2.5 Persamaan pada Mekanisme Hidrolik.....	19
2.5.1 Persamaan Bernoulli.....	19
2.5.2 Konservasi Massa pada Mekanika Fluida	20
2.5.3 Persamaan Fluida Gas untuk Sistem Suspensi <i>Hydro- Pneumatic</i>	21
2.5.4 Persamaan Fluida Minyak untuk Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	21

2.6	Gaya Tekan Ban (<i>Road Holding</i>).....	22
2.7	Pengaruh Percepatan Kendaraan terhadap Kenyamanan Pengendara.....	23
BAB III METODOLOGI		25
3.1	Metode Penelitian.....	25
3.2	Tahap Studi Literatur.....	27
3.3	Pemodelan dan Simulasi Simulasi Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	28
3.3.1	Pemodelan Fisik Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	28
3.3.2	Pemodelan Matematis dan Pembuatan Persamaan dari Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	29
3.3.3	Pembuatan Blok Simulasi Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	31
3.3.4	Analisis Grafik Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i> ..	35
3.4	Pemodelan dan Simulasi Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dan Gaya tekan Ban dengan Penggunaan Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	35
3.4.1	Pemodelan Matematis dan Pembuatan Persamaan dari Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dan Gaya tekan Ban dengan Penggunaan Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	35
3.4.2	Pembuatan Blok Simulasi Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dan Gaya tekan Ban dengan Penggunaan Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	37
3.4.3	Analisis Grafik Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dan Gaya tekan Ban (<i>Road Holding</i>) dengan Penggunaan Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	39
BAB III PEMODELAN SISTEM		41
4.1	Pemodelan Dinamis Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i> ..	41
4.1.1	Gaya Pegas (F_k)	41
4.1.2	Gaya Redam (F_d)	42
4.2	Pemodelan Dinamis Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i> ..	43

4.3	Diagram Blok	48
4.3.1	Input yang Digunakan	48
4.3.2	Diagram Blok Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	51
4.3.3	Diagram Blok Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	51
BAB V ANALISA DAN PEMBAHASAN		55
5.1	Respon Dinamis Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i> pada Variasi Tekanan Awal Gas (p_0), Volume Awal Gas (V_0), dan Diameter <i>Orifice</i> (D_0) dengan Variasi Frekuensi.....	56
5.2	Respon Dinamis Kendaraan dari Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	70
5.2.1	Variasi Jenis Gas	71
5.2.1.1	Input <i>Bump</i> yang Dimodifikasi	71
5.2.1.2	Input Sinusoidal.....	77
5.2.2	Variasi Tekanan Awal Gas	83
5.2.2.1	Input <i>Bump</i> yang Dimodifikasi	83
5.2.2.2	Input Sinusoidal.....	89
5.3	Respon Dinamis Penumpang dari Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i>	94
5.3.1	Variasi Jenis Gas	95
5.3.1.1	Input <i>Bump</i> yang Dimodifikasi	95
5.3.1.2	Input Sinusoidal.....	101
5.3.2	Variasi Tekanan Awal Gas	109
5.3.2.1	Input <i>Bump</i> yang Dimodifikasi	109
5.3.2.2	Input Sinusoidal.....	115
5.4	Respon Dinamis Gaya Tekan dari Ban (<i>Road Holding</i>) akibat Penggunaan Sistem Suspensi <i>Hydro-Pneumatic</i> .	122
5.4.1	Variasi Jenis Gas	123
5.4.2	Variasi Tekanan Ban	125
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....		131

6.1	Kesimpulan.....	131
6.2	Saran.....	134
	DAFTAR PUSTAKA.....	135
	BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konstruksi mobil.....	5
Gambar 2.2	Sistem pada kendaraan roda 4.....	6
Gambar 2.3	Sistem suspensi pada mobil.....	6
Gambar 2.4	(a) Suspensi poros kaku (b) Suspensi bebas.....	7
Gambar 2.5	Komponen sistem suspensi ^[15]	8
Gambar 2.6	<i>Shock absorber</i>	9
Gambar 2.7	Cara kerja sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i> bagian depan	11
Gambar 2.8	Cara kerja sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i> bagian belakang	12
Gambar 2.9	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang pesawat terbang terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 5$).....	14
Gambar 2.10	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang pesawat terbang terhadap waktu dengan input sinusoidal	15
Gambar 2.11	Diagram <i>stress-strain</i> dari massa yang mempunyai <i>material damping</i> ^[9]	16
Gambar 2.12	Contoh sederhana dari sistem <i>free vibrations with damping</i>	17
Gambar 2.13	Contoh sederhana dari sistem <i>forced vibration with damping</i>	18
Gambar 2.14	Grafik variasi T_d dan ϕ terhadap r	18
Gambar 2.15	Penerapan hukum Bernoulli pada sebuah pipa.....	19
Gambar 2.16	Ilustrasi untuk aliran dalam suatu kontrol volume .20	
Gambar 2.17	<i>Free body diagram</i> gaya tekan ban	23
Gambar 2.18	Ketahanan badan manusia terhadap percepatan linier yang dapat diterima.....	24
Gambar 3.1	Diagram alir penyelesaian tugas akhir.	26
Gambar 3.2	Model fisik rancangan sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i>	29
Gambar 3.3	Model matematis rancangan sisten suspensi <i>hydro-pneumatic</i>	29

Gambar 3.4	Diagram alir pembuatan persamaan gerak dari sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i>	30
Gambar 3.5	Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i> , variasi tekanan awal gas (p_o) pada volume awal gas (V_o) konstan yaitu untuk masing-masing jenis gas.....	32
Gambar 3.6	Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i> dengan variasi volume awal gas (V_o) pada tekanan awal gas (p_o) konstan untuk masing-masing jenis gas	33
Gambar 3.7	Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink dari sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i> dengan variasi diameter penampang <i>orifice</i> (D_o) pada tekanan awal gas (p_o) dan volume awal gas (V_o) konstan untuk masing masing jenis gas.....	34
Gambar 3.8	Model matematis sistem seperempat kendaraan mobil.....	36
Gambar 3.9	Diagram alir pembuatan persamaan gerak sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i>	37
Gambar 3.10	Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i>	38
Gambar 4.1	Model matematis rancangan sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i>	41
Gambar 4.2	<i>Free body diagram</i> kendaraan model <i>half-car</i>	43
Gambar 4.3	<i>Free Body Diagram</i> untuk sistem mobil dengan penggunaan sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i>	45
Gambar 4.4	Profil jalan dengan input <i>bump</i> yang dimodifikasi (a) $\gamma = 1$ (b) $\gamma = 5$ (c) $\gamma = 20$	49
Gambar 4.5	Profil jalan dengan input sinusoidal	50
Gambar 4.6	Diagram blok untuk gaya pegas pada sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i>	51
Gambar 4.7	Diagram blok untuk gaya redam pada sistem suspensi <i>hydro pneumatic</i>	51

Gambar 4.8	Diagram blok untuk input <i>bump modified</i>	52
Gambar 4.9	Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan mobil dengan input <i>bump modified</i>	53
Gambar 4.10	Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan mobil dengan input sinusoidal.....	54
Gambar 5.1	Skema sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i>	56
Gambar 5.2	Grafik respon perpindahan dan kecepatan terhadap gaya redam pada massa jenis minyak ($\rho=860 \text{ kg/m}^3$), diameter piston ($D_p = 3 \text{ cm}$) dan diameter <i>orifice</i> ($D_o = 1-3 \text{ mm}$) dengan variasi frekuensi.....	58
Gambar 5.3	Grafik pengaruh variasi frekuensi terhadap gaya redam maksimum yang dihasilkan dari sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i> dengan massa jenis minyak ($\rho=860 \text{ kg/m}^3$) dan diameter piston ($D_p = 3 \text{ cm}$) pada masing-masing diameter <i>orifice</i> ($D_o = 1-3 \text{ mm}$).....	60
Gambar 5.4	Grafik respon perpindahan terhadap gaya pegas pada diameter piston ($D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$), volume awal gas ($V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$), dan tekanan awal gas ($p_o = 1,2 \text{ MPa} - 2 \text{ MPa}$) untuk berbagai jenis gas dengan variasi frekuensi.....	63
Gambar 5.5	Grafik respon gaya pegas terhadap perpindahan pada diameter piston ($D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$), tekanan awal gas ($p_o = 1,6 \text{ MPa}$), dan volume awal gas ($V_o = 0,00007854 - 0,00009854 \text{ m}^3$) dengan variasi frekuensi.....	66
Gambar 5.6	Grafik Perbandingan pengaruh variasi frekuensi terhadap gaya pegas maksimum yang dihasilkan dari sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i> antara variasi tekanan awal gas dengan variasi volume awal gas.	69
Gambar 5.7	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 1$), dengan variasi jenis gas.....	71

Gambar 5.8	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 5$), dengan variasi jenis gas.....	73
Gambar 5.9	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 20$), dengan variasi jenis gas.....	75
Gambar 5.10	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/jam), dengan variasi jenis gas	77
Gambar 5.11	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/h), dengan variasi jenis gas	79
Gambar 5.12	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/h), dengan variasi jenis gas	81
Gambar 5.13	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 1$), dengan variasi tekanan awal gas	83
Gambar 5.14	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 5$), dengan variasi tekanan awal gas	85
Gambar 5.15	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 20$), dengan variasi tekanan awal gas	87
Gambar 5.16	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil	

	terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/h), dengan variasi tekanan awal gas.....	89
Gambar 5.17	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/h), dengan variasi tekanan awal gas.....	91
Gambar 5.18	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/h), dengan variasi tekanan awal gas.....	93
Gambar 5.19	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 1$), dengan variasi jenis gas	96
Gambar 5.20	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 5$), dengan variasi jenis gas	98
Gambar 5.21	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 20$), dengan variasi jenis gas	100
Gambar 5.22	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/h), dengan variasi jenis gas	102
Gambar 5.23	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/jam), dengan variasi jenis gas	103
Gambar 5.24	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/jam), dengan variasi jenis gas	105

- Gambar 5.25 Grafik respon percepatan RMS penumpang pada sistem seperempat kendaraan mobil terhadap frekuensi dengan input sinusoidal dengan variasi kecepatan 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam 107
- Gambar 5.26 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$), dengan variasi tekanan awal gas 109
- Gambar 5.27 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$), dengan variasi jenis gas 111
- Gambar 5.28 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$), dengan variasi tekanan awal gas 113
- Gambar 5.29 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/jam), dengan variasi jenis gas 115
- Gambar 5.30 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/jam), dengan variasi jenis gas 117
- Gambar 5.31 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/jam), dengan variasi jenis gas 119
- Gambar 5.32 Grafik respon percepatan RMS penumpang pada sistem seperempat kendaraan mobil terhadap frekuensi dengan input sinusoidal dengan variasi kecepatan 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam 121
- Gambar 5.33 Grafik respon dinamis gaya tekan ban (road holding) (a) kecepatan 20 km//jam, (b) kecepatan 40 km//jam, (c) kecepatan 60 km//jam pada

- seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal dan variasi jenis gas..... 124
- Gambar 5.34 Grafik respon dinamis gaya tekan ban (*road holding*) (a) kecepatan 20 km//jam, (b) kecepatan 40 km//jam, (c) kecepatan 60 km//jam pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal dan variasi tekanan gas pada ban 126
- Gambar 5.35 Grafik perbesaran respon dinamis gaya tekan ban (*road holding*) (a) kecepatan 20 km//jam, (b) kecepatan 40 km//jam, (c) kecepatan 60 km//jam pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal dan variasi tekanan gas pada ban 127
- Gambar 5.36 Grafik perbandingan respon RMS gaya tekan ban (*road holding*) pada ban dengan input sinusoidal setiap variasi kecepatan kendaraan untuk variasi jenis gas dan variasi tekanan ban 129

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Reaksi kenyamanan terhadap percepatan – ISO 2631 ^[6] 24
Tabel 3.1	Parameter sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i> 31
Tabel 3.2	Parameter untuk simulasi sistem seperempat kendaraan mobil 39
Tabel 5.1	Parameter yang digunakan saat simulasi respon gaya redam pada sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i> , pada massa jenis minyak (ρ), diameter piston (D_p) dan diameter <i>orifice</i> (D_o) dengan variasi frekuensi 57
Tabel 5.2	Nilai gaya redam maksimum untuk massa jenis minyak ($\rho=860 \text{ kg/m}^3$) dan diameter piston ($D_p = 3 \text{ cm}$) pada masing-masing diameter <i>orifice</i> ($D_o = 1\text{-}3 \text{ mm}$) 59
Tabel 5.3	Parameter yang digunakan saat simulasi respon gaya pegas pada sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i> , pada diameter piston (D_p), volume awal gas (V_o), dan tekanan awal gas (p_o) dengan variasi frekuensi 61
Tabel 5.4	Nilai gaya pegas maksimum untuk semua jenis gas dengan diameter piston ($D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$) dan volume awal gas ($V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$) pada masing-masing tekanan awal gas ($p_o = 1,2 \text{ MPa} - 2 \text{ MPa}$) dengan variasi frekuensi 64
Tabel 5.5	Parameter yang digunakan respon gaya pegas pada sistem suspensi <i>hydro-pneumatic</i> , pada diameter piston (D_p), tekanan awal gas (p_o), dan volume awal gas (V_o), dan dengan variasi frekuensi 65
Tabel 5.6	Nilai gaya pegas maksimum untuk semua jenis gas pada diameter piston ($D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$) dan tekanan awal gas ($p_o = 1,6 \text{ MPa}$) pada masing-masing volume awal gas (V_o) dengan variasi frekuensi 67
Tabel 5.7	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil

	terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 1$), dengan variasi jenis gas.....	72
Tabel 5.8	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 5$), dengan variasi jenis gas.....	74
Tabel 5.9	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 20$), dengan variasi jenis gas.....	76
Tabel 5.10	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/jam), dengan variasi jenis gas	78
Tabel 5.11	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/h), dengan variasi jenis gas	80
Tabel 5.12	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/h), dengan variasi jenis gas	82
Tabel 5.13	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 1$), dengan variasi tekanan awal gas	84
Tabel 5.14	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 5$), dengan variasi tekanan awal gas	86
Tabel 5.15	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 20$), dengan variasi tekanan awal gas	88

Tabel 5.16	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/h), dengan variasi tekanan awal gas.....	90
Tabel 5.17	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/h), dengan variasi tekanan awal gas.....	92
Tabel 5.18	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/jam), dengan variasi tekanan awal gas.....	94
Tabel 5.19	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 1$), dengan variasi jenis gas	95
Tabel 5.20	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 5$), dengan variasi jenis gas	97
Tabel 5.21	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 20$), dengan variasi jenis gas	99
Tabel 5.22	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/h), dengan variasi jenis gas	102
Tabel 5.23	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/jam), dengan variasi jenis gas	104
Tabel 5.24	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan	

	mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/jam), dengan variasi jenis gas 106
Tabel 5.25	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 1$), dengan variasi tekanan awal gas 110
Tabel 5.26	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 5$), dengan variasi jenis gas 112
Tabel 5.27	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i> ($\gamma = 20$), dengan variasi tekanan awal gas 114
Tabel 5.28	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/jam), dengan variasi jenis gas 116
Tabel 5.29	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/jam), dengan variasi jenis gas 118
Tabel 5.30	Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/jam), dengan variasi jenis gas 120
Tabel 5.31	Nilai gaya tekan ban maksimum dengan variasi nilai kecepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal dan variasi jenis gas 123
Tabel 5.32	Nilai gaya tekan ban maksimum dengan variasi nilai kecepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal dan variasi tekanan gas pada ban 125

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem suspensi merupakan salah satu komponen mekanik yang penting dalam suatu kendaraan, utamanya mobil, yang terletak di antara bodi kendaraan dengan roda. Sistem suspensi yang berfungsi untuk menahan kejutan atau getaran yang terjadi agar tidak berpindah pada bodi ini terdiri dari upper arm, lower arm, pegas (spring), dan peredam kejutan (shock absorber). Sistem suspensi sering kali menimbulkan suatu permasalahan yaitu getaran yang berlebihan. Getaran ini apabila tidak diantisipasi maka akan menyebabkan kegagalan pada mesin, berkurangnya tingkat keamanan pada mobil serta perasaan tidak nyaman pada penumpang.

ISO 2631/1974 telah menetapkan batas-batas getaran yang boleh dialami oleh pengemudi selama mengendarai kendaraan.^[11] Untuk memenuhi kriteria yang ditetapkan oleh standar tersebut, maka sistem suspensi mobil harus dirancang dengan desain yang baik agar mampu menghadapi kondisi perubahan jalan, perubahan kecepatan dan massa muatan. Sistem suspensi tersebut harus memiliki properti nilai kekakuan dan redaman yang sesuai. Pada sistem suspensi pasif (konvensional), nilai kekakuan pegas dan konstanta redamannya bernilai konstan. Sedangkan pada sistem suspensi aktif nilai kekakuan pegas dan konstanta redamannya bisa berubah-ubah karena dicontrol. Sistem suspensi pada mobil dapat dimodelkan dalam bentuk model seperempat kendaraan, karena hal itu sudah mewakili keseluruhan sistem yang ada dari suatu mobil.

Sistem suspensi yang biasa digunakan pada mobil adalah *hydro-pneumatic* shock absorber. Pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* ini menggunakan minyak sebagai fluida kerja pada silinder hidrolik dan menggunakan gas nitrogen. Parameter-parameter yang ada pada sistem suspensi ini seperti dimensi

shock absorber, tekanan dan volume fluida akan mempengaruhi karakteristik redaman dari sistem tersebut, serta dapat mempengaruhi respon dinamis dari mobil saat sistem suspensi tersebut dipasangkan pada mobil serta mempengaruhi gaya tekan dari ban pada mobil tersebut. Oleh karena itu, dilakukan analisa untuk mengetahui respon dinamis dan karakteristik dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada mobil.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Bagaimana pengaruh perubahan parameter diameter *orifice* silinder hidrolis, fluida kerja gas, volume awal gas, dan tekanan awal gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* terhadap gaya redam dan gaya pegas ?
2. Bagaimana respon dinamis dari kendaraan dan penumpang akibat penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada mobil ?
3. Bagaimana gaya tekan (*road holding*) dari ban kendaraan akibat penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada mobil ?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Untuk simulasi, hanya menggunakan seperempat kendaraan (*quarter car*), dan kendaraan yang digunakan adalah mobil Mitsubishi New Outlander Sport.
2. Fluida kerja minyak pada silinder hidrolis diasumsikan *incompressible flow*.
3. Fluida kerja gas pada silinder hidrolis diasumsikan mengalami proses *adiabatic* yaitu tidak ada kalor yang masuk (diserap) dan keluar (dilepaskan) dari sistem.

4. Profil jalan dimodelkan sebagai input *bump* dan sinusoidal.
5. Parameter yang digunakan dalam simulasi didapat berdasarkan jurnal.
6. Tipe mobil yang dimodelkan yaitu Mitsubishi Outlander Sport

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Memodelkan dan menganalisa pengaruh perubahan parameter diameter *orifice* silinder hidrolik, fluida kerja gas, volume awal gas, dan tekanan awal gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* terhadap gaya redam dan gaya pegas.
2. Memodelkan dan menganalisa respon dinamis dari kendaraan dan penumpang akibat penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada mobil.
3. Memodelkan dan menganalisa gaya tekan (*road holding*) dari ban kendaraan akibat penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada mobil.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Memberikan informasi mengenai pengaruh perubahan parameter diameter *orifice* silinder hidrolik, fluida kerja gas, volume awal gas, dan tekanan awal gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* terhadap gaya redam dan gaya pegas.
2. Memberikan informasi mengenai respon dinamis dari kendaraan dan penumpang akibat penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada mobil.
3. Memberikan informasi mengenai gaya tekan (*road holding*) dari ban kendaraan akibat penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada mobil.

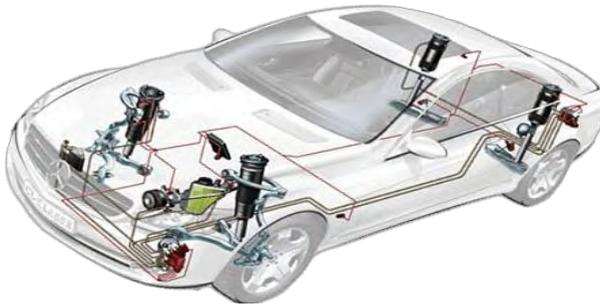
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kontruksi Mobil

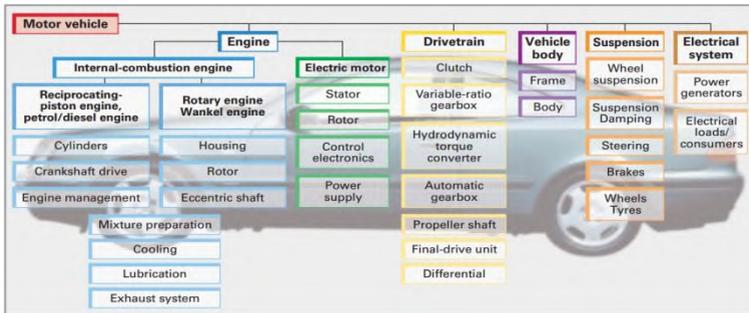
Mobil adalah suatu kendaraan darat yang digerakkan oleh tenaga mesin yang mengubah energi kimia pada bahan bakar dan udara menjadi energi gerak (mekanik) yang disalurkan untuk menggerakkan roda, memiliki roda sebanyak empat atau lebih dan selalu genap, mobil biasanya menggunakan bahan bakar minyak yaitu bensin atau solar untuk menghidupkan mesinnya. Sebagai suatu sistem, mobil seperti terlihat pada gambar 2.1 memiliki bagian-bagian utama yang menyusunnya^[12]. Setiap bagian mobil memiliki peran tersendiri. Bagian tersebut merupakan suatu sistem utuh yang menyusun dan menyokong setiap fungsi dari kendaraan. Sistem kendaraan roda 4 dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.1 Konstruksi mobil

Secara garis besar, terdapat beberapa bagian-bagian mobil yaitu:

1. Unit Daya (Mesin)
2. Sistem Pemindah Daya (Drivetrain)
3. Sistem Suspensi
4. Bagian Support dan Penyangga (Body)
5. Sistem Kelistrikan Mobil



Gambar 2.2 Sistem pada kendaraan roda 4

2.1.1 Sistem Suspensi Mobil

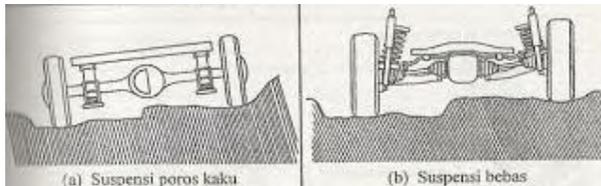
Sistem suspensi adalah kumpulan komponen tertentu yang berfungsi meredam kejutan, getaran yang terjadi pada kendaraan akibat permukaan jalan yang tidak rata yang dapat meningkatkan kenyamanan berkendara dan pengendalian kendaraan. Sistem suspensi terdiri dari beberapa bagian yaitu pegas, peredam kejut dan lengan. Sistem suspensi kendaraan terletak di antara bodi (kerangka) dengan roda, seperti terlihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sistem suspensi pada mobil

Ada dua jenis utama suspensi^[13] yaitu seperti terlihat pada gambar 2.4,

- a. Sistem suspensi dependen atau sistem suspensi poros kaku (*rigid*)
 Pada awalnya semua sistem suspensi pada mobil menggunakan model ini, bahkan sekarang pun masih banyak digunakan pada kendaraan berat. Poros kaku (yang tunggal) dihubungkan ke rangka atau bodi dengan pegas (pegas daun atau pegas koil) dan shock absorber, sehingga tidak ada lengan-lengan suspensi seperti pada suspensi independen.
- b. Sistem suspensi independen atau sistem suspensi bebas.
 Suspensi independen ini digunakan pada roda mobil penumpang atau truk kecil. Tetapi sekarang suspensi bebas banyak digunakan juga pada roda belakang mobil penumpang. Pada suspensi independen roda-roda kiri dan kanan tidak dihubungkan secara langsung pada poros tunggal. Kedua roda bergerak secara bebas tanpa saling mempengaruhi.



Gambar 2.4 (a) Suspensi poros kaku (b) Suspensi bebas

Sistem suspensi mobil terdiri dari Komponen^[14] sebagai berikut,

- a. Pegas
 Pegas berfungsi untuk menyerap kejutan dari jalan dan getaran roda-roda agar tidak diteruskan ke bodi secara langsung. Ada beberapa tipe pegas pada kendaraan diantaranya *Coil Spring*, Pegas daun, dan Pegas Batang Torsi.
- b. *Shock Absorber*
 Dalam menyerap kejutan-kejutan pegas harus bekerja sama dengan *shock absorber*, tanpa *shock absorber* pegas akan

bergerak naik turun lebih lama dan *shock absorber* mampu meredam getaran pegas seketika dan membuangnya menjadi energi panas.

c. *Ball Joint*

Ball joint selain berfungsi sebagai sumbu putaran roda juga dapat menerima beban vertikal maupun lateral. Didalam ball joint terdapat gemuk untuk melumasi bagian yang bergesekan dan pada beberapa periode gemuk harus diganti.

d. *Stabilizer Bar*

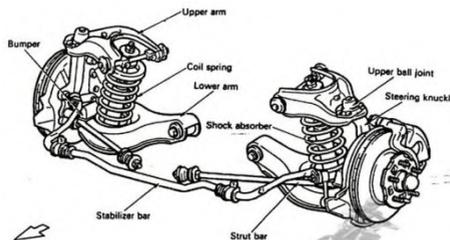
Stabilizer bar (batang penyetabil) berfungsi mengurangi kemiringan mobil akibat gaya sentrifugal pada saat mobil membelok dan juga untuk menambah daya jejak ban. Pada suspensi depan *Stabilizer bar* dipasang biasanya dipasang pada kedua lower arm melalui bantalan karet dan *linkage* dan bagian tengah diikat dengan rangka/bodi pada dua tempat melalui *bushing*.

e. *Strut Bar*

Strut bar berfungsi untuk menahan *lower arm* agar tidak bergerak mundur pada saat menerima kejutan dari permukaan jalan yang tidak rata atau dorongan akibat terjadi pengereman.

f. *Lateral Control Rod*

Komponen ini di pasang diantara poros penyangga (*axel*) dan bodi mobil, fungsinya untuk menahan *axel* selalu pada posisinya bila menerima beban samping.

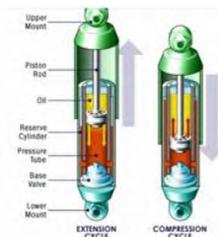


Gambar 2.5 Komponen sistem suspensi^[15]

2.1.2 Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

Jika suatu suspensi hanya dilengkapi dengan sebuah pegas saja, maka setiap kendaraan yang menghantam bump akan mengalami pantulan yang naik turun selama beberapa kali pada frekuensi natural pegasnya. Ketika tertekan oleh sebuah bump, sebuah sistem suspensi membutuhkan komponen untuk mendisipasi energi yang tersimpan pada pegas. Shock absorber atau peredam kejut adalah alat yang digunakan untuk mendisipasi energi tersebut^[2].

Konstruksi umum dari peredam kejut adalah seperti terlihat pada gambar 2.6. Peredam kejut ini terdiri dari bagian silinder yang berfungsi penutup dan tempat pemasangan piston. Pada bagian dalam terdapat katup-katup yang berguna untuk mengalirkan fluida dari tabung atas ke tabung bawah^[8].



Gambar 2.6 *Shock absorber*

Untuk kendaraan, konstruksi peredam dibuat sedemikian sehingga saat langkah tekan, gaya peredaman dibuat minimal sedangkan saat langkah tarik, gaya peredaman dibuat maksimal. Alasannya, pada langkah tekan, massa sprung menghantam bumi, sesuai hukum Newton, maka gaya reaksi yang diterima badan kendaraan akan sepadan dengan aksi. Oleh sebab itu, diupayakan gaya peredaman minimal saat kendaraan bergerak ke bawah supaya gaya yang diterima penumpang juga minimal. Sebaliknya, saat langkah tarik, kendaraan hanya menghantam udara. Oleh karena itu, tak akan ada reaksi berlebihan yang diterima penumpang^[2].

Hydro-pneumatic adalah jenis sistem suspensi yang biasa digunakan pada mobil. Pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* ini menggunakan minyak sebagai fluida kerja pada silinder hidrolis dan menggunakan gas nitrogen sebagai fluida gas kerja. Silinder *hydro-pneumatic* digunakan pada silinder suspensi untuk mengurangi getaran. Pada sistem ini silinder suspensi diisi dengan oli dan gas nitrogen.

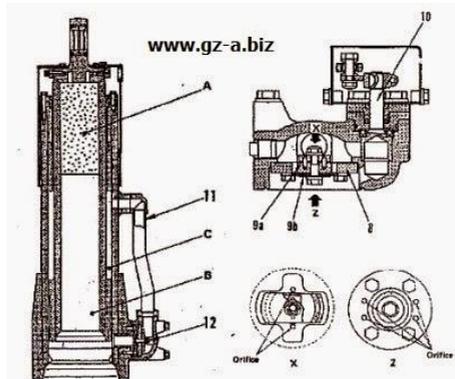
Cara kerja dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* adalah dengan cara mengkompresi atau mengekspansi gas nitrogen dan oli untuk meredam beban dari permukaan jalan. Pada unit *dump truck* silinder suspensi ini terbagi dua yaitu suspensi depan dan suspensi belakang.

- Suspensi Bagian Depan

Dari gambar 2.7 dapat dijelaskan sebagai berikut, bagian dalam silinder terbagi menjadi ruangan gas A yang diisi nitrogen dan ruang oli B. Antara ruangan oli B dan C dihubungkan dengan tube (11) dan valve body (12). Ketika unit bergerak roda akan mengikuti permukaan jalan dan gaya dari luar akan membuat suspensi naik atau turun. Saat itu terjadi, volume nitrogen pada ruang A berubah elastis tergantung gaya input dan akan meredam gaya tersebut. Gas nitrogen dibatasi oleh *rod* dan oli sehingga tekanan terjaga untuk selalu sesuai dengan gaya dari luar dan bekerja sebagai *air spring*^[16].

Pada *valve body* (12) terdapat *orifice plate* (8) dan *leaf spring* (9a) dan (9b) yang akan menahan aliran oli antara ruang B dan ruang C sehingga akan menghasilkan *damping force*. Saat gas nitrogen mendapat tekanan dari luar, oli dari ruang B mengalir melalui *valve* (12) dan *tube* (11) ke ruang C. Oli mengalir melalui valve dari arah Z ke *orifice plate* (8) dimana volumenya akan dikurangi melalui *orifice* pada empat tempat, ini adalah proses *retracting* (memendek). Sedangkan saat *extending* (memanjang), ketika sudah tidak ada gaya dari luar tekanan dari nitrogen mendorong *rod*, oli akan melewati tube (11) dan valve (12) untuk mengalir ke ruang B. Oli mengalir dari arah X melalui dua *orifice*

pada *orifice plate* (8). Dari proses tersebut akan dihasilkan *damping force* dimana proses *retracting* cepat sedangkan proses *extending* (memendek) akan lebih lama.



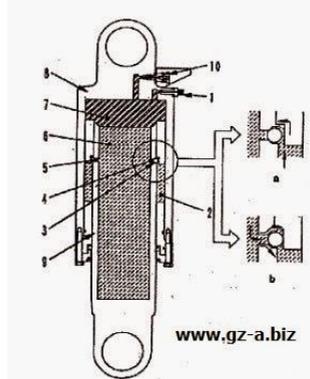
Gambar 2.7 Cara kerja sistem suspensi *hydro-pneumatic* bagian depan

- Suspensi Bagian Belakang

Pada suspensi bagian belakang ketika ada beban dari luar *rod* akan tertekan masuk sehingga oli akan mengalir dari ruang oli (6) melalui *orifice* (4) dan (5) ke rongga (2) dengan cepat. Setelah tidak ada beban dari luar oli pada rongga (2) akan didesak keluar. Oli akan menodong *check ball* (3) menutup *orifice* (4) sehingga oli hanya akan melewati *orifice* (5) menuju ruang (6). Karena itu proses *extending* akan lama^[12].

Bila dibandingkan antara sistem suspensi *hydro-pneumatic* dengan sistem suspensi pegas daun. Maka sistem suspensi *hydro-pneumatic* akan lebih fleksibel karena pada sistem suspensi tipe *rigid* pegas daun, roda kiri dan roda kanan dihubungkan oleh axle tunggal, dengan begitu, roda kiri dan kanan akan selalu berhubungan dan saling mempengaruhi. Ketika salah satu roda melewati jalan yang tidak rata, maka ini akan mempengaruhi roda yang lain, sehingga getaran yang diterima dari keadaan jalan akan langsung diteruskan ke bodi kendaraan. Akibatnya ketika

melewati jalan yang tidak rata, maka guncangan dalam kendaraan akan cenderung lebih besar, dan pengemudian menjadi kurang nyaman.



Gambar 2.8 Cara kerja sistem suspensi *hydro-pneumatic* bagian belakang

Pada suspensi rigid, roda kanan dan kiri terintegrasi dalam satu poros, sehingga perubahan posisi salah satu roda akan mempengaruhi pergerakan roda yang lain. Dengan cara kerja pegas daun yang pada prinsipnya semua pegas adalah melawan gaya yang diterima oleh pegas dengan arah yang berlawanan, sehingga kesannya memantul. Begitu juga dengan pegas daun, pegas ini ketika tidak mendapatkan beban, maka dia berbentuk melengkung seperti huruf U. Ketika menerima gaya, maka bagian yang pertama menerima gaya adalah bagian eye yang dibantu dengan shackle, akibat adanya beban yang diterima di kedua ujung pegas daun, maka bentuk pegas daun akan cenderung lebih datar atau rata. Ketika beban yang diterima dihilangkan, maka dengan sifatnya yang lentur, dia akan kembali ke bentuk semula yang menyerupai bentuk huruf U dengan tiba-tiba dan dapat menimbulkan osilasi pemegasan. Hal ini akan diredam oleh adanya shock absorber, sehingga gaya osilasi dari pegas dapat diserap.

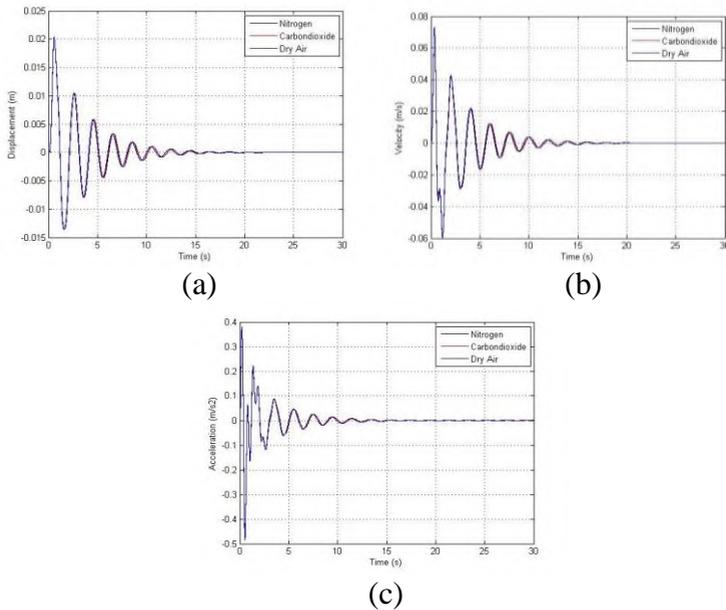
Tujuan dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* adalah untuk menyediakan sistem suspensi yang sensitif, dinamis, dan berkapasitas tinggi yang menawarkan kualitas yang unggul. Sebuah sistem suspensi *hydro-pneumatic* menggabungkan keunggulan dari dua prinsip yang pertama yaitu hidrolis dan *pneumatic*. Penggambaran keberhasilan dari sistem ini sudah dipakai pada sistem suspensi dari pesawat terbang. Kelebihan dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* yaitu sangatlah nyaman digunakan, efisiensi tinggi, dan gas nitrogen yang sebagai pegasnya enam kali lebih fleksibel dari baja konvensional yang merupakan bahan pegas pada sistem suspensi.

2.1.3 Sistem Suspensi *Oleo-Pneumatic* pada Pesawat Boeing 747-400 Saat *Landing* dan *Take-Off*

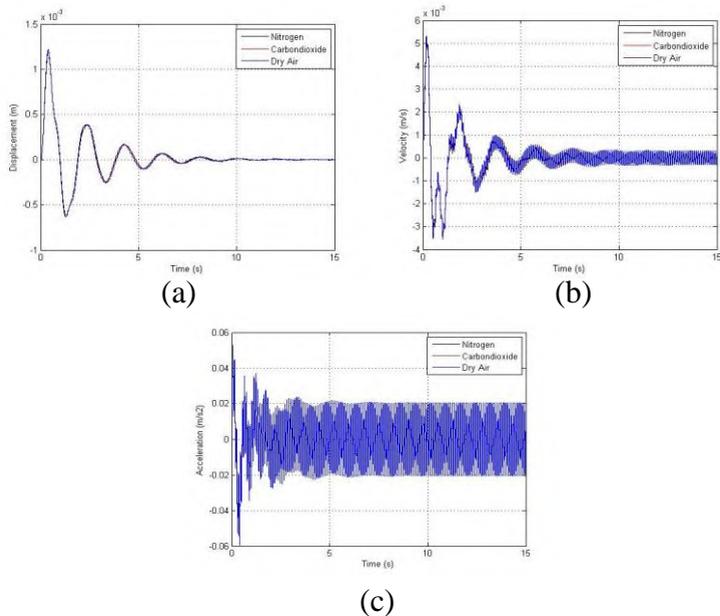
Penelitian mengenai sistem suspensi *hydro-pneumatic*, telah dilakukan oleh Yunita Hestiningrum pada tahun 2015 dan dimuat dengan judul “Pemodelan dan Analisis Pengaruh Perubahan Parameter Sistem Suspensi *Oleo-Pneumatic* terhadap Gaya Redam dan Gaya Pegas serta Respon Dinamis Penumpang Pesawat Boeing 747-400 saat Proses *Landing* dan *Takeoff*”^[10] tetapi diterapkan pada sistem suspensi pesawat terbang. Melalui model matematis dan pemodelan dengan software Matlab, penelitian ini menjelaskan dan membahas karakteristik sistem suspensi *landing gear* pasif dengan perubahan parameter. Input yang digunakan pada tugas akhir ini adalah input sinusoidal dan *bump modified*.

Dari sistem suspensi *oleo-pneumatic* didapatkan bahwa semakin kecil luas penampang *orifice* (A_o), maka gaya redam yang dihasilkan akan semakin besar, Semakin besar tekanan awal gas (p_0) yang digunakan pada sistem suspensi *oleo-pneumatic*, maka gaya pegas yang dihasilkan semakin besar. Dan semakin besar volume awal gas (V_0) yang digunakan, maka gaya pegas yang dihasilkan semakin besar. Pada sistem pesawat terbang dengan penambahan system suspensi *oleo-pneumatic* untuk input *bump modified* (kondisi landing), seluruh respon merupakan

respon transient dan mencapai kondisi steady state kurang dari 25 detik terlihat pada gambar 2.9. Sedangkan untuk input sinusoidal (kondisi takeoff) dengan kecepatan pesawat terbang saat takeoff yaitu sebesar 196 knots = 362,992 km/jam, respon dinamis berupa perpindahan, kecepatan dan percepatan dari penumpang mencapai kondisi steady state sebelum 15 detik terlihat pada gambar 2.10. Dari ketiga jenis gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai RMS untuk percepatan getaran penumpang adalah tidak ada keluhan (nyaman) apabila dibandingkan dengan standar ISO 2631.



Gambar 2.9 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang pesawat terbang terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$)



Gambar 2.10 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang pesawat terbang terhadap waktu dengan input sinusoidal

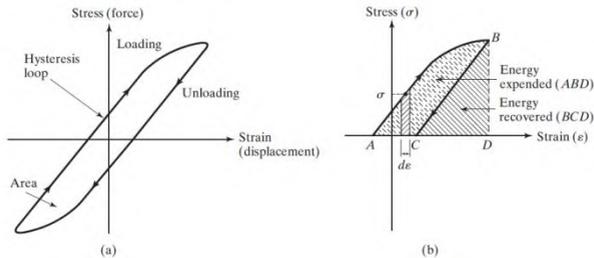
2.2 Redaman

Pada umumnya, energi getaran diubah menjadi panas atau suara. Karena pengurangan energi, respon (seperti perpindahan pada sistem) akan menurun. Mekanisme dari energi getaran diubah menjadi panas atau suara diketahui sebagai redaman (*damping*). Walaupun jumlah energi yang diubah menjadi panas atau suara relatif kecil, pertimbangan redaman menjadi penting untuk prediksi yang akurat dari respon getaran sistem^[9]. Berikut beberapa jenis redaman :

- *Viscous Damping*^[9] merupakan mekanisme redaman yang paling sering digunakan dalam analisa getaran. Saat sistem mekanis bergetar dalam media fluida (seperti udara, gas, air,

atau oli), perlawanan dari fluida terhadap sistem inilah yang menyebabkan energi terdisipasi. Jumlah energi yang terdisipasi bergantung beberapa factor, yaitu bentuk dan ukuran massa yang bergetar, viskositas fluida, frekuensi getaran, dan kecepatan massa tersebut bergetar. Dalam *viscous damping*, gaya redam sebanding dengan kecepatan massa bergetar. Contoh dari *viscous damping*: (1) film cairan antara permukaan geser, (2) aliran cairan di sekitar piston di dalam silinder, (3) aliran fluida melalui lubang (*orifice*), dan (4) film cairan di sekitar sebuah jurnal di bantalan (*bearing*).

- *Coulomb or Dry-Friction Damping*^[9]. Gaya redam besarnya konstan tetapi berlawanan arah dengan gerak massa yang bergetar. Hal ini disebabkan oleh gesekan antara menggosok permukaan yang baik kering atau pelumasan cukup.



Gambar 2.11 Diagram *stress-strain* dari massa yang mempunyai *material damping*^[9]

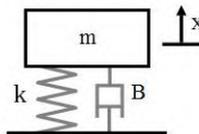
- *Material or Solid or Hysteretic Damping*^[9]. Ketika material berdeformasi, energi akan diserap dan terdisipasi oleh material. Hal ini disebabkan karena gesekan antara bagian dalam yang slip atau bergeser karena deformasi. Saat sebuah massa yang mempunyai *material damping* bergetar, diagram *stress-strain* ada pada gambar 2.11. Daerah yang ditunjukkan pada gambar, menunjukkan energi yang hilang tiap unit volume massa per cycle karena redaman yang terjadi.

2.3 Motion of Base

Getaran didefinisikan sebagai gerakan bolak balik dari suatu benda dari titik awalnya melalui titik setimbangnya^[4]. Ilustrasi yang paling sederhana adalah sebuah pendulum yang berayun. Secara umum, sistem getaran termasuk sarana untuk menyimpan energi potensial (pegas), sarana untuk menyimpan energi kinetik (massa atau inersia), dan sarana untuk menghilangkan energi secara bertahap (peredam)^[4]. Jika sistem teredam, beberapa energi akan terdisipasi ke dalam siklus getaran dan harus digantikan dengan sumber eksternal jika keadaan getaran stabil yang diinginkan. Sistem getaran yang sederhana meliputi massa, pegas, dan peredam.

Getaran dapat diklasifikasikan menjadi :

- *Free vibration*, terjadi ketika sistem mekanik berangkat dengan input awal dan kemudian dibiarkan bergetar secara bebas^[7].
 - *Free vibration with damping*

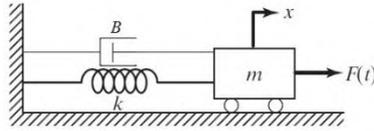


Gambar 2.12 Contoh sederhana dari sistem *free vibrations with damping*

Berikut penurunan persamaan dari gambar 2.12:

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + kx = 0 \quad (2.1)$$

- *Forced vibration*, terjadi jika sistem mekanik terkena gaya luar^[4].
 - *Forced vibration with damping*



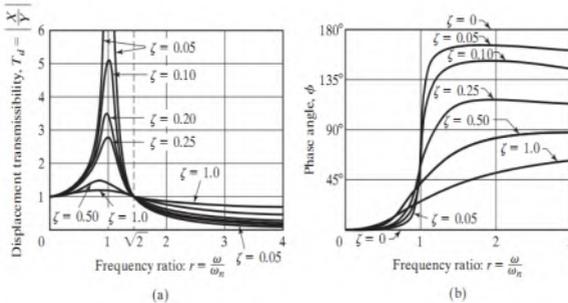
Gambar 2.13 Contoh sederhana dari sistem *forced vibration with damping*

Berikut penurunan persamaan dari gambar 2.13:

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + kx = F(t) \quad (2.2)$$

2.4 Transmisibilitas Perpindahan (*Displacement Transmissibility*)

Rasio dari amplitudo respon $x_p(t)$ terhadap *base motion* $y(t)$, yaitu $\frac{X}{Y}$, disebut dengan *displacement transmissibility*^[4]. *Displacement transmissibility* adalah seberapa besar respon gerakan yang ditransmisikan dari input jalan ke massa kendaraan dengan variasi frekuensi saat berkendara. Grafik transmisibilitas perpindahan dapat dilihat pada gambar 2.14 di bawah ini.



Gambar 2.14 Grafik variasi T_d dan ϕ terhadap r

Berikut ini merupakan karakteristik yang didapat dari gambar 2.14a, yaitu:

1. $T_d = 1$ saat $r = 0$ dan mendekati 1 untuk nilai r yang sangat kecil

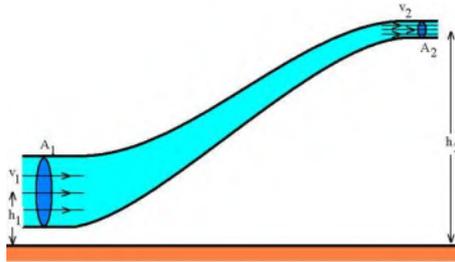
2. Untuk sistem yang tak teredam ($\zeta = 0$), T_d menuju tak hingga saat $r = 1$ (resonansi)
3. Nilai $T_d < 1$ ketika $r = \sqrt{2}$, untuk semua nilai ζ
4. Nilai $T_d = 1$ ketika $r = \sqrt{2}$, untuk semua nilai ζ
5. Untuk $r < \sqrt{2}$, semakin kecil nilai ζ maka akan semakin besar T_d -nya. Sebaliknya,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

$$r_m = \frac{1}{2\zeta} \left[\sqrt{1 + 8\zeta^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.3)$$

2.5 Persamaan pada Mekanisme Hidrolik

2.5.1 Persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli menyatakan bahwa jumlah energi pada suatu titik di dalam suatu aliran tertutup sama besarnya dengan jumlah energi di titik lain pada jalur aliran yang sama. Prinsip ini diambil dari nama ilmuwan Belanda/Swiss yang bernama Daniel Bernoulli^[1].



Gambar 2.15 Penerapan hukum Bernoulli pada sebuah pipa

Dalam bentuknya yang sudah disederhanakan, secara umum terdapat dua bentuk persamaan Bernoulli; yang pertama berlaku untuk aliran tak-termampatkan (*incompressible flow*), dan yang lain adalah untuk fluida termampatkan (*compressible flow*).

Berikut ini persamaan Bernoulli untuk aliran yang tak termampatkan (*incompressible flow*) :

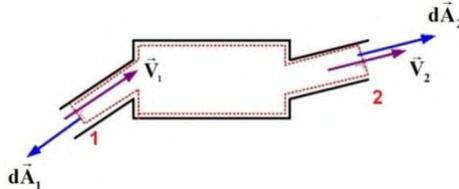
Persamaan Bernoulli ^[1] :

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 \quad (2.4)$$

Keterangan:

- p_1 : Tekanan fluida pada kondisi 1 (N/m²)
- p_2 : Tekanan fluida pada kondisi 2 (N/m²)
- v_1 : Kecepatan aliran fluida pada kondisi 1 (m/s)
- v_2 : Kecepatan aliran fluida pada kondisi 2 (m/s)
- h_1 : Tinggi pipa kondisi 1 (m)
- h_2 : Tinggi pipa kondisi 2 (m)
- g : gravitasi bumi (9.8 m/s²)

2.5.2 Konservasi Massa pada Mekanika Fluida



Gambar 2.16 Ilustrasi untuk aliran dalam suatu kontrol volume

$$\left. \frac{dM}{dt} \right)_{system} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.6)$$

karena diasumsikan aliran incompressible, $\rho = \text{konstan}$, sehingga:

$$\cancel{\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV} + \rho \int_{CS} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\rho \int_{CS} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\int_{CS} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.7)$$

dimana ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
 \mathcal{V} : volume fluida (m^3)
 \vec{V} : kecepatan (m/s)
 A : luas area (m^2)

2.5.3 Persamaan Fluida Gas untuk Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

Gaya pegas F_k merupakan gaya yang dihasilkan oleh tekanan gas nitrogen pada ruang atas^[10]. P dan V dari gas diasumsikan memenuhi persamaan untuk proses *adiabatic* sebagai berikut :

$$\frac{p_0}{p} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^n \quad (2.8)$$

$$V = V_0 - A(x_s) \quad (2.9)$$

Sehingga persamaan gaya pegas dapat dituliskan sebagai berikut :

$$F_k = pA \quad (2.10)$$

dimana p_0 : tekanan awal gas (MPa)
 V_0 : volume awal gas (m^3)
 p : tekanan gas saat ini (MPa)
 V : volume gas saat ini (m^3)
 A : luas permukaan piston = $\pi D_p^2 / 4$ (m^2)
 x_s : *shock absorber stroke*/besar perpindahan batang piston (m)
 n : indeks adiabatik gas yaitu sebesar 1,1 untuk nitrogen, 1.3 untuk karbondioksida, dan 1.4 untuk udara kering^[10]

2.5.4 Persamaan Fluida Minyak untuk Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

Gaya redam dipengaruhi oleh energi disipasi dari minyak yang mengalir melalui *orifice*^[10]. Minyak tersebut diasumsikan *incompressible fluid* dan p_l merepresentasikan perbedaan tekanan antara ruang bawah dan atas (MPa). Dari hukum konservasi massa dan persamaan Bernoulli, maka didapat persamaan sebagai berikut :

$$A(\dot{x}_s) = \xi A_0 v_l \quad (2.11)$$

$$p_l = \frac{1}{2} \rho (v_l^2 - (\dot{x}_s)^2) \quad (2.12)$$

dimana ξ : koefisien *discharge orifice* yang didapatkan dari eksperimen

A_0 : luas penampang *orifice* = $\pi D_o^2 / 4$ (m²)

v_l : kecepatan minyak yang mengalir melalui *orifice* (m/s²)

\dot{x}_s : kecepatan piston relatif terhadap daerah di luar silinder dari *hydro-pneumatic shock absorber* (m/s²)

ρ : densitas dari minyak (kg/m³)

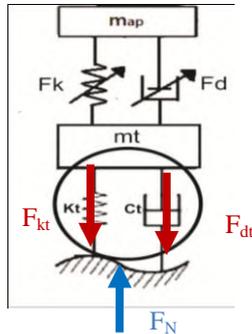
A : luas permukaan piston = $\pi D_p^2 / 4$ (m²)

Sehingga gaya redamannya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Fd = p_l A \quad (2.13)$$

2.6 Gaya Tekan Ban (*Road Holding*)

Gaya tekan ban (*Road Holding*) merupakan kemampuan dari ban untuk menapak jalan pada saat berinteraksi dengan jalan akibat dari adanya sistem suspensi . Besarnya gaya tekan ban sebanding dengan gaya normal akibat gaya pegas dan gaya redam pada ban yang menekan jalan sesuai dengan persamaan 2.14.



Gambar 2.17 *Free body diagram* gaya tekan ban

Berdasarkan gambar 2.17, besarnya gaya tekan ban yaitu,

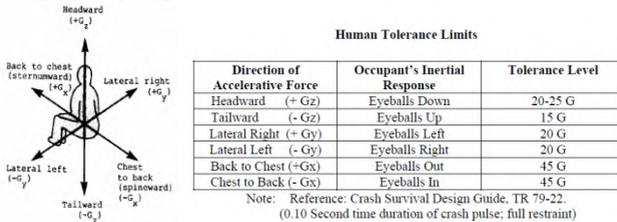
$$\begin{aligned}
 +\uparrow \Sigma F_x &= 0 \\
 F_N - F_{d_t} - F_{k_t} &= 0 \\
 F_N &= F_{d_t} + F_{k_t}
 \end{aligned}$$

dimana F_N : gaya tekan ban (N)
 F_{d_t} : gaya redam dari ban (N)
 F_{k_t} : gaya pegas dari ban (N)

2.7 Pengaruh Percepatan Kendaraan terhadap Kenyamanan Pengendara

Gerakan utama yang dialami pengemudi selama mengemudi adalah 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 2.18. 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 2.18 Ketahanan badan manusia terhadap percepatan linier yang dapat diterima

Untuk kriteria kenyamanan berdasarkan besar percepatan menurut standart ISO 2631, ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 2.1 Reaksi kenyamanan terhadap percepatan – ISO 2631^[6]

No.	Getaran	Keterangan
1.	$a < 0.315 \text{ m/s}^2$	Tidak ada keluhan
2.	$0.315 \text{ m/s}^2 < a < 0.63 \text{ m/s}^2$	Sedikit tidak nyaman
3.	$0.5 \text{ m/s}^2 < a < 0.1 \text{ m/s}^2$	Agak tidak nyaman
4.	$0.8 \text{ m/s}^2 < a < 1.6 \text{ m/s}^2$	Tidak nyaman
5.	$1.25 \text{ m/s}^2 < a < 2.5 \text{ m/s}^2$	Sangat tidak nyaman
6.	$a > 2 \text{ m/s}^2$	Amat sangat tidak nyaman

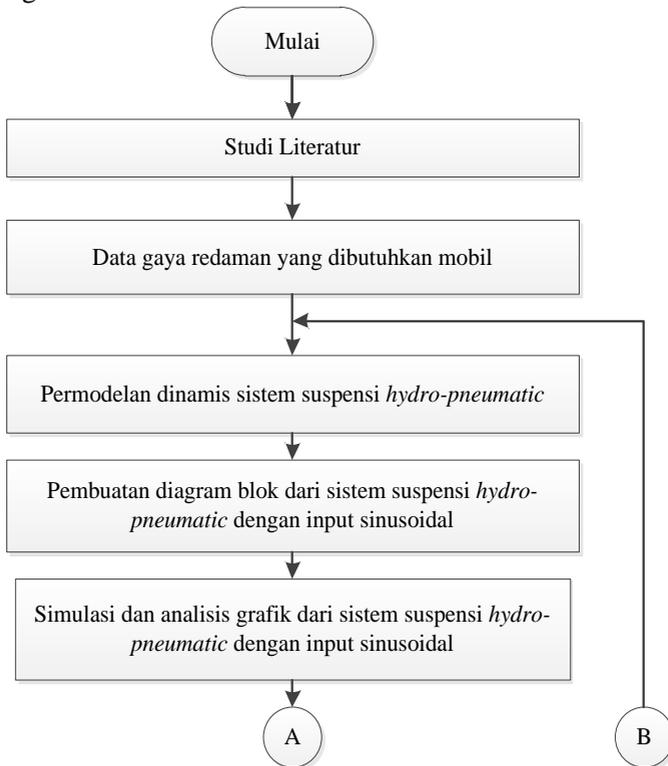
Selain berdasarkan kenyamanan, acuan baik tidaknya suspensi kendaraan juga dilihat berdasarkan kenyamanan. Ditinjau dari segi keamanan, suspensi dikatakan relatif aman jika roda dan permukaan jalan melekat dengan baik atau diusahakan defleksi pada roda seminimal mungkin^[5]. Defleksi maksimum dari suspensi depan sebesar 10 cm, sedangkan untuk suspensi belakang maksimum sebesar 12 cm^[5].

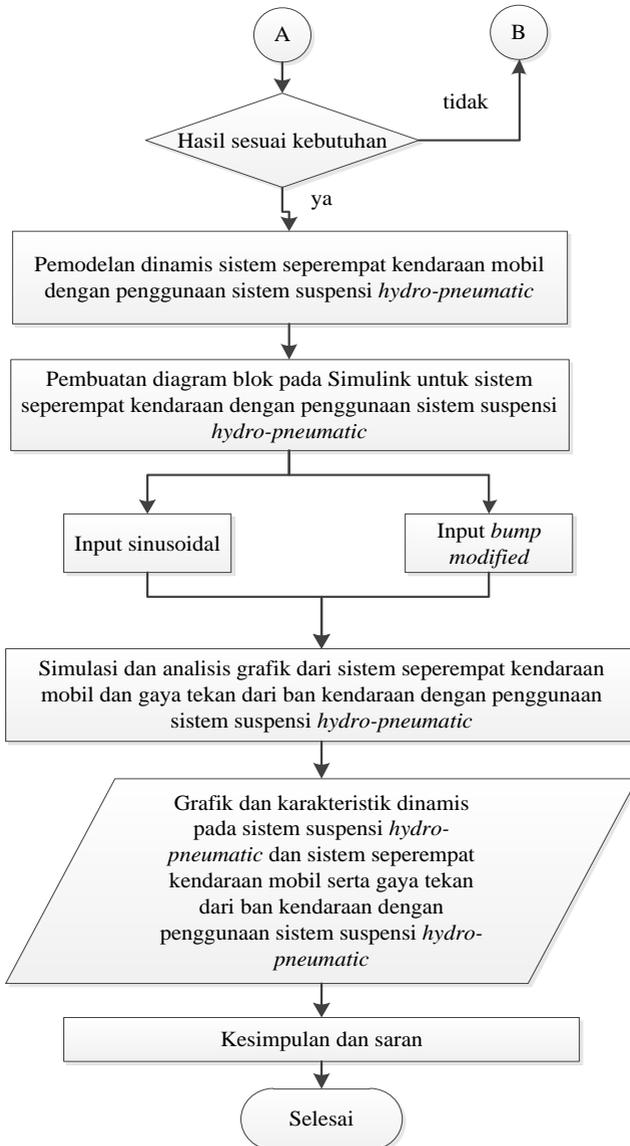
BAB III

METODOLOGI

3.1 Metode Penelitian

Penulisan tugas akhir ini dilakukan untuk mengetahui respon dinamis berupa perpindahan dan kecepatan dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada mobil. Dalam proses analisis dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.1.





Gambar 3.1. Diagram alir penyelesaian tugas akhir.

Metode pelaksanaan tugas akhir ini secara umum ditunjukkan pada gambar 3.1, dimulai dari studi literatur dan studi lapangan mengenai sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada model seperempat kendaraan mobil. Langkah selanjutnya yaitu pemodelan fisik dan matematis untuk sistem *hydro-pneumatic*. Kemudian membuat persamaan gerak dari sistem tersebut. Selanjutnya adalah membuat blok diagram pada MATLAB Simulink dengan input sinusoidal. Dari Simulink tersebut, didapatkan grafik karakteristik gaya redam dengan variasi dimensi *shock absorber* (luas penampang *orifice*), serta grafik karakteristik gaya pegas dengan variasi tekanan dan volume awal gas dari sistem suspensi *hydro-pneumatic*. Fluida kerja gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* disimulasikan dengan menggunakan tiga jenis gas yang berbeda yaitu nitrogen, karbondioksida, dan udara kering. Untuk selanjutnya, sistem suspensi *hydro-pneumatic* ini dipasangkan pada sistem seperempat kendaraan mobil dan menggunakan langkah yang sama, yaitu dengan membuat model fisik dan matematis. Kemudian dilanjutkan dengan membuat persamaan gerak dari sistem tersebut. Selanjutnya membuat blok diagram dengan input sinusoidal dan *bump modified*. Dari simulasi tersebut didapatkan grafik karakteristik dinamis dari sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada mobil serta gaya tekan dari ban kendaraan dengan penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada mobil. Setelah itu dilakukan analisis dari grafik tersebut dan membuat kesimpulan berdasarkan hasil yang didapat yang berhubungan dengan kenyamanan penumpang dan memberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

3.2 Tahap Studi Literatur

Dalam penulisan tugas akhir ini diperlukan referensi-referensi yang dapat menunjang dalam menganalisis sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada mobil. Oleh karena itu, dilakukan studi literatur untuk menambah wawasan, pengetahuan, dan

landasan mengenai permasalahan yang akan dibahas. Adapun materi dari studi literatur yang mendukung dalam penulisan tugas akhir ini yaitu mekanika getaran dasar, pemodelan sistem dinamis, sistem mekanis getaran translasi, sistem hidrolik, proses *adiabatic*, serta pembuatan blok diagram pada program MATLAB Simulink. Sedangkan studi lapangan yang dilakukan meliputi penentuan nilai parameter dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* yang digunakan dalam pemodelan dan simulasi sistem. Nilai parameter tersebut adalah berupa data teknis dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* yang meliputi dimensi *shock absorber*, massa mobil saat kosong dan massa maksimum mobil dengan adanya penumpang, dan kecepatan saat berjalan dari mobil Mitsubishi Outlander Sport.

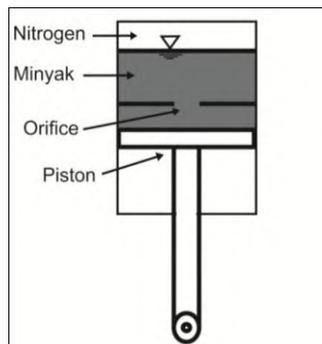
Referensi untuk studi literatur didapat dari buku, jurnal-jurnal ilmiah, maupun penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan. Sedangkan studi lapangan meliputi penentuan dimensi pada mobil didapat dari data hasil penelitian oleh kelompok yang membuat perancangan alat terkait.

3.3 Pemodelan dan Simulasi Simulasi Sistem Suspensi *Hydro-pneumatic*

3.3.1 Pemodelan Fisik Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

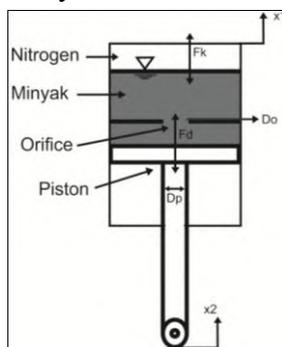
Model sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada mobil digambarkan seperti gambar 3.2. Peredam (*absorber*) adalah komponen utama dari sistem pasif. Sistem ini terdiri dari ruang bawah dan atas dengan luasan tertentu. Kedua ruang tersebut dihubungkan oleh sebuah lubang kecil (*orifice*) berdiameter D_o . Volume atas pada ruang atas diisi dengan nitrogen bertekanan dan volume sisa pada ruang atas dan bawah dipenuhi minyak. Desain absorber ini menghasilkan gaya pegas dan gaya redam sekaligus. Saat mobil berjalan, *shock-strut* mengalami kompresi dan ekspansi. Gerakan ini mendorong minyak mengalir melalui *orifice*, yang menghilangkan sejumlah energi akibat *impact* atau eksitasi. saat proses kompresi, minyak mengalir dari ruang bawah

ke ruang atas, menekan nitrogen yang menyimpan energi *impact* atau eksitasi. Ketika energi yang tersimpan ini dilepaskan pada proses ekspansi, *shock-strut* memanjang dan minyak mengalir dari ruang atas ke ruang bawah, sehingga menghilangkan energi *impact* atau eksitasi tersebut. Siklus kompresi dan ekspansi ini terus terjadi hingga seluruh energi *impact* atau eksitasi saat mobil berjalan menghilang.



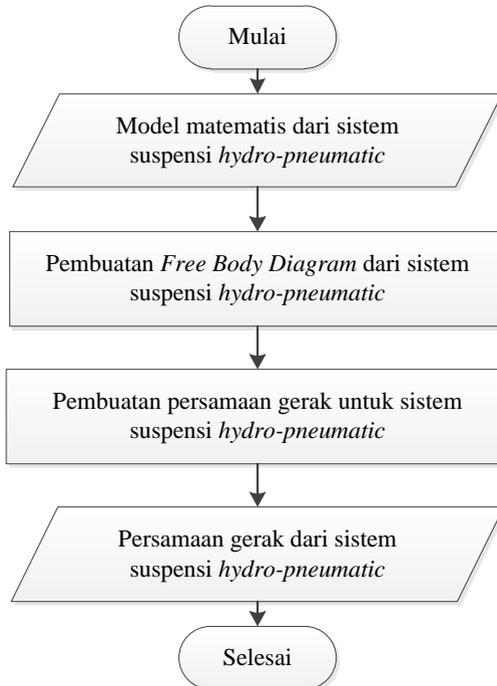
Gambar 3.2 Model fisik rancangan sistem suspensi *hydro-pneumatic*

3.3.2 Pemodelan Matematis dan Pembuatan Persamaan dari Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*



Gambar 3.3 Model matematis rancangan sisten suspensi *hydro-pneumatic*

Pemodelan matematis untuk sistem suspensi *hydro-pneumatic* ini, seperti terlihat pada gambar 3.3, meliputi silinder hidrolis, piston, *orifice* dan dua fluida kerja di dalamnya yaitu minyak dan gas (nitrogen, karbondioksida, atau udara kering).



Gambar 3.4 Diagram alir pembuatan persamaan gerak dari sistem suspensi *hydro-pneumatic*.

Setelah didapatkan model matematis, maka selanjutnya membuat persamaan gerak dari sistem tersebut. Secara garis besar proses pembuatan persamaan gerak dapat ditransformasikan menjadi diagram alir pada gambar 3.4.

3.3.3 Pembuatan Blok Simulasi Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

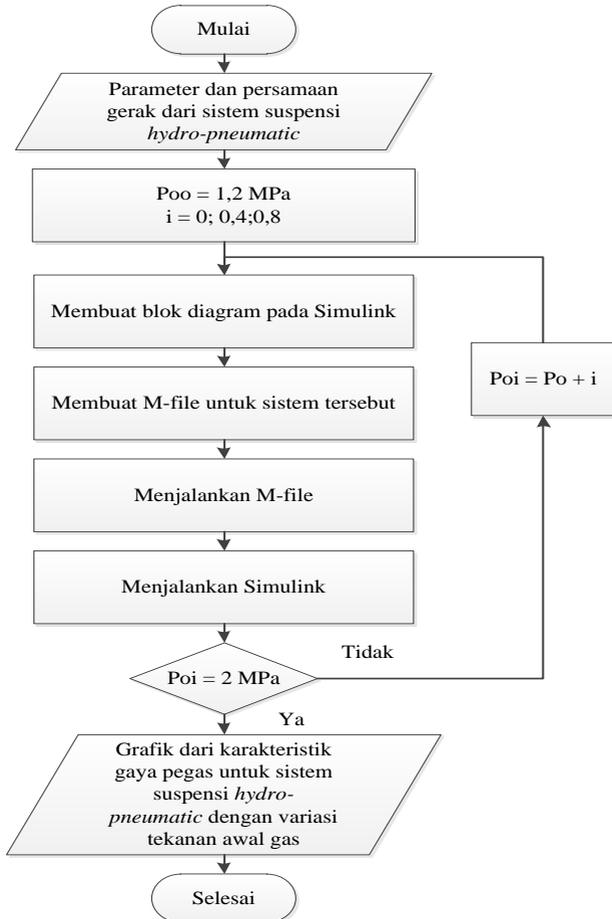
Setelah mendapatkan persamaan gerak dari sistem, langkah selanjutnya yaitu membuat blok simulasi. Berikut merupakan parameter yang digunakan untuk membuat simulasi sistem suspensi *hydro-pneumatic* :

Tabel 3.1 Parameter sistem suspensi *hydro-pneumatic*

Parameter	Nilai	Keterangan
Koefisien discharge <i>orifice</i> (ξ)	0,3	Untuk F_d
Diameter shock absorber (D)	0,05 m	
Diameter piston (D_p)	0,03 m	Untuk F_d dan F_k
Diameter <i>orifice</i> (D_o)	0,002 m	Untuk F_d
Massa jenis minyak (ρ)	860 Kg/m ³	Untuk F_d

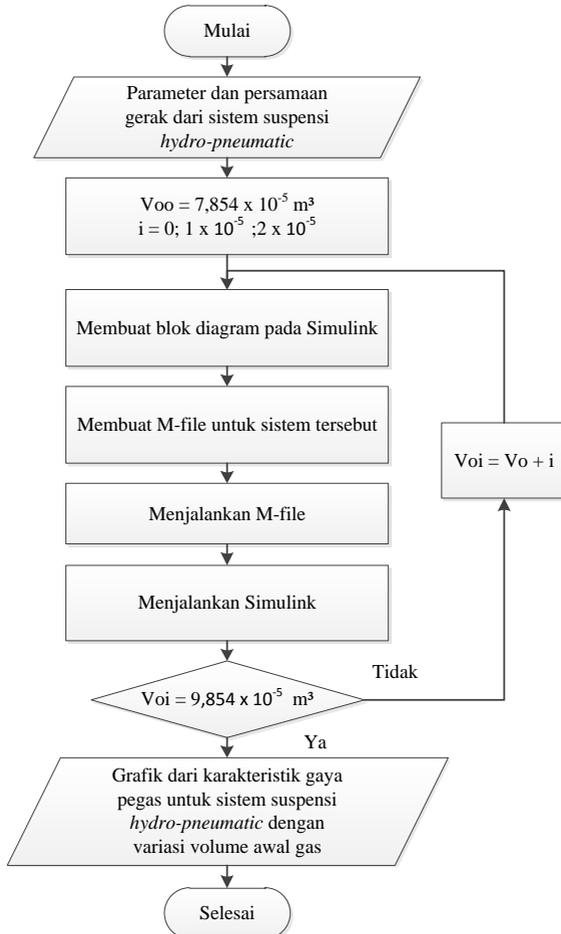
Proses pembuatan blok diagram pada Simulink dijelaskan berupa diagram alir pada gambar 3.5, 3.6, 3.7. Input yang digunakan yaitu input sinusoidal dengan amplitudo 2 cm, variasi frekuensi perpindahan batang piston yaitu 0,5-2 Hz. Variasi tekanan awal gas (p_o) sebesar 1,2 – 2 MPa pada volume awal gas (V_o) konstan yaitu sebesar $8,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ untuk masing-masing jenis gas (nitrogen, karbondioksida, dan udara kering). Dan variasi volume awal gas (V_o) sebesar $7,854 \times 10^{-5} - 9,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ pada tekanan awal gas (p_o) konstan yaitu sebesar 1,6 MPa untuk masing-masing jenis gas. Serta variasi diameter *orifice* sebesar 0.001 m – 0.003 m dengan tekanan awal gas (p_o) dan volume awal gas (V_o) konstan yaitu sebesar 1,6 MPa dan $8,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ untuk masing-masing jenis gas.

- Variasi tekanan awal (p_o) dengan volume awal gas (V_o) konstan yaitu sebesar $8,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ untuk masing masing jenis gas (nitrogen, karbondioksida, dan udara kering).



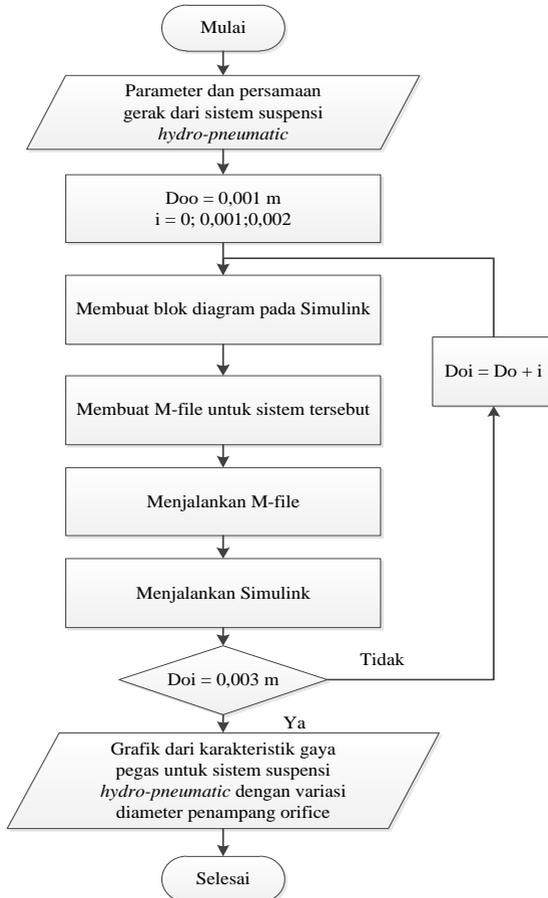
Gambar 3.5 Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink sistem suspensi *hydro-pneumatic*, variasi tekanan awal gas (p_o) pada volume awal gas (V_o) konstan yaitu untuk masing-masing jenis gas

- Variasi volume awal gas (V_o) dengan tekanan awal gas (p_o) konstan yaitu sebesar 1,6 MPa untuk masing-masing jenis gas (nitrogen, karbondioksida, dan udara kering).



Gambar 3.6 Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink sistem suspensi *hydro-pneumatic* dengan variasi volume awal gas (V_o) pada tekanan awal gas (p_o) konstan untuk masing-masing jenis gas

- Variasi diameter penampang *orifice* (D_o) dengan tekanan awal gas (p_o) dan volume awal gas (V_o) konstan yaitu sebesar 1,6 MPa dan $8,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ untuk masing-masing jenis gas (nitrogen, karbondioksida, dan udara kering).



Gambar 3.7 Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* dengan variasi diameter penampang *orifice* (D_o) pada tekanan awal gas (p_o) dan volume awal gas (V_o) konstan untuk masing masing jenis gas

3.3.4 Analisis Grafik Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

Dari simulasi yang telah dilakukan untuk sistem suspensi *hydro-pneumatic*, akan didapatkan grafik karakteristik gaya redam, yaitu berupa grafik gaya redam terhadap perpindahan maupun kecepatan dengan variasi diameter *orifice* (D_o) sebesar 0.001 m – 0.003 m pada tekanan awal gas (p_o) dan volume awal gas (V_o) konstan yaitu sebesar 1,6 Mpa dan $8,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ untuk masing-masing jenis gas (nitrogen, karbondioksida, dan udara kering). Selain itu juga akan didapatkan grafik karakteristik gaya pegas terhadap perpindahan dengan variasi tekanan awal gas (p_o) sebesar 1,2 - 2 Mpa pada volume awal gas (V_o) konstan yaitu sebesar $8,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ untuk masing-masing jenis gas, variasi volume awal gas (V_o) sebesar $7,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3 - 9,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ pada tekanan awal gas (p_o) konstan yaitu sebesar 1,6 Mpa untuk masing-masing jenis gas.

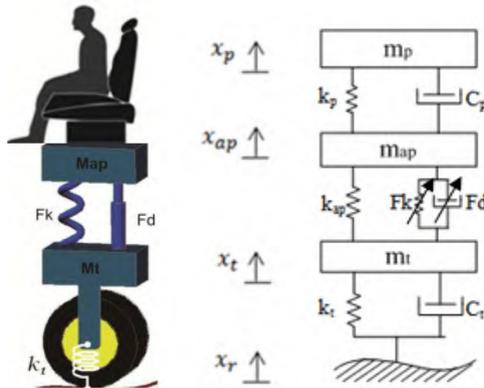
Setelah itu grafik-grafik tersebut dianalisis dan diambil kesimpulan. Kemudian dipilih salah satu hasil dari variasi diameter *orifice* tersebut yang memiliki gaya redam terbesar dan terkecil, serta variasi tekanan dan volume awal gas untuk masing-masing jenis gas yang memiliki gaya pegas terbesar dan terkecil untuk selanjutnya digunakan sebagai parameter sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada sistem seperempat kendaraan mobil.

3.4 Pemodelan dan Simulasi Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dan Gaya tekan Ban dengan Penggunaan Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

3.4.1 Pemodelan Matematis dan Pembuatan Persamaan dari Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dan Gaya tekan Ban dengan Penggunaan Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

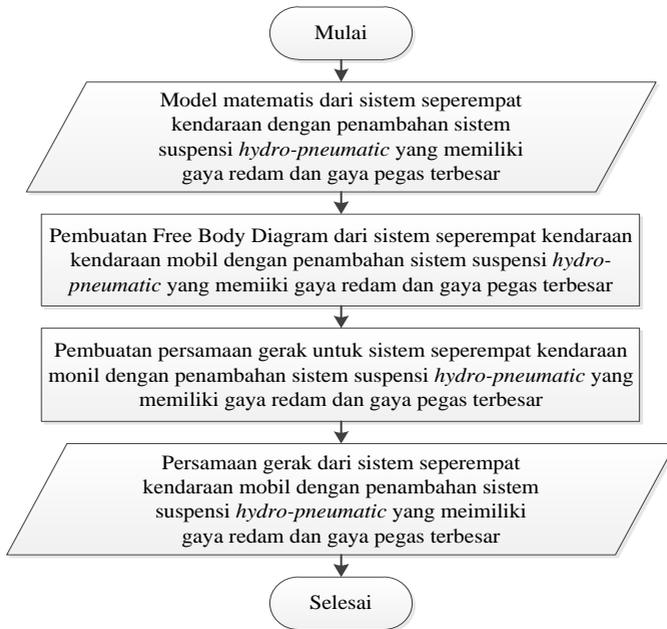
Pemodelan yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah pemodelan seperempat kendaraan dengan dua derajat kebebasan (3 DOF). Pada gambar 3.8 di bawah ini menunjukkan model seperempat kendaraan mobil yang meliputi, m_p yaitu massa alas

duduk dan penumpang, m_{ap} yaitu massa seperempat kendaraan, m_t yaitu massa ban, F_k merupakan gaya pegas yang dihasilkan oleh adanya fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, k_{ap} mewakili konstanta kekakuan dari pegas *shock absorber* sistem suspensi *hydro-pneumatic*, k_t yaitu kontanta kekakuan dari ban, k_p mewakili konstanta kekakuan dari alas duduk penumpang, c_p merupakan konstanta redaman dari alas duduk penumpang, c_t yaitu konstanta redaman dari ban dan F_d merupakan gaya redam yang dihasilkan oleh adanya fluida minyak dari sistem suspensi *hydro-pneumatic*.



Gambar 3.8 Model matematis sistem seperempat kendaraan mobil

Setelah didapatkan model matematis, maka selanjutnya membuat persamaan gerak dari sistem tersebut. Sistem suspensi *hydro-pneumatic* yang dipasang pada mobil merupakan sistem suspensi yang memiliki gaya redam dan gaya pegas terbesar atau terkecil dari ketiga variasi diatas. Secara garis besar proses pembuatan persamaan gerak dapat ditransformasikan menjadi diagram alir pada gambar 3.9.

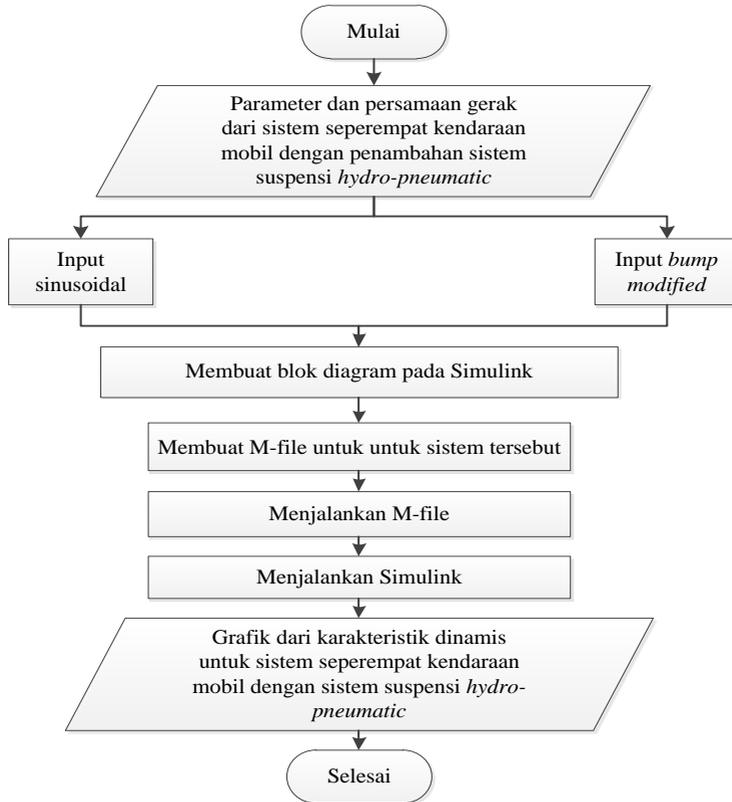


Gambar 3.9 Diagram alir pembuatan persamaan gerak sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic*

3.4.2 Pembuatan Blok Simulasi Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dan Gaya tekan Ban dengan Penggunaan Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

Setelah mendapatkan persamaan gerak dari sistem, langkah selanjutnya yaitu membuat blok simulasi. Parameter yang digunakan untuk sistem seperempat kendaraan mobil yaitu data referensi berdasarkan jurnal dari mobil Mitsubishi Outlander Sport. Parameter yang digunakan untuk simulasi sistem seperempat kendaraan dengan penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic* terdapat pada tabel 3.2.

Proses pembuatan blok diagram pada Simulink dijelaskan berupa diagram alir pada gambar 3.10. Input yang digunakan yaitu input sinusoidal dan *bump modified*.



Gambar 3.10 Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic*.

Tabel 3.2 Parameter untuk simulasi sistem seperempat kendaraan mobil

Parameter	Nilai	Keterangan
Massa mobil kosong (M_{ap})	1425 kg	-
Massa ban (M_t)	200 kg	-
Massa 1 penumpang (M_p)	60 kg	-
Konstanta pegas <i>shock absorber</i> (K_{ap})	180000 N/m	
Konstanta pegas alas duduk (K_p)	115,5 N/m	Jenis bantalan kursi : Comfort Mate Foam
Koefisien damping alas duduk (C_p)	1149 N.s/m	
Konstanta pegas ban (K_t)	221982 N/m	Jenis ban Radial Tekanan ban 30 psi
Koefisien damping ban (C_t)	3430 N.s/m	

3.4.3 Analisis Grafik Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dan Gaya tekan Ban (*Road Holding*) dengan Penggunaan Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

Dari simulasi sistem seperempat kendaraan mobil, akan didapatkan respon dinamis, berupa perpindahan, kecepatan, maupun percepatan dari input sinusoidal maupun *bump modified*, serta gaya tekan dari ban, dengan memodifikasi blok diagram pada Simulink.

Grafik-grafik tersebut dianalisis dan diharapkan sistem suspensi *hydro-pneumatic* ini mampu mengurangi vibrasi pada bodi mobil akibat beban *impact* saat proses berjalan dan akibat energi eksitasi oleh profil permukaan jalan yang tidak rata saat mobil berjalan dengan kecepatan yang sangat tinggi pada proses berjalan secara optimal, sehingga vibrasi yang diterima oleh penumpang sangat kecil. Kemudian juga dianalisis grafik dari gaya tekan ban akibat penggunaan dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut. Gaya cengkram ban ini menunjukkan bahwa seberapa besar pengaruh gaya tekan pada jalan, sehingga dapat

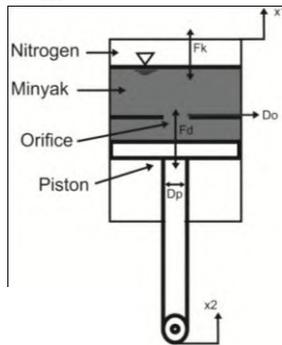
diketahui posisi ban dengan jalan. Selanjutnya dilakukan evaluasi dan mengambil kesimpulan dari hasil analisis yang berhubungan dengan kenyamanan penumpang dan evaluasi yang telah dilakukan.

BAB IV

PEMODELAN SISTEM

4.1 Pemodelan Dinamis Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

Untuk sistem suspensi *hydro-pneumatic* ini menggunakan mekanisme hidrolik dengan dua fluida kerja yaitu gas dan minyak. Gas ini berfungsi sebagai *spring* untuk menghasilkan gaya pegas, sedangkan minyak berfungsi sebagai *damper* untuk menghasilkan gaya redam.



Gambar 4.1 Model matematis rancangan sistem suspensi *hydro-pneumatic*

Persamaan yang digunakan pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* ini adalah sebagai berikut :

4.1.1 Gaya Pegas (F_k)

Gaya pegas F_k merupakan gaya yang dihasilkan oleh tekanan gas nitrogen pada ruang atas. P dan V dari gas diasumsikan memenuhi persamaan untuk proses *adiabatic* sebagai berikut :

$$\frac{p_0}{p} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^n \quad (4.1)$$

$$V = V_0 - A(x_s) \quad (4.2)$$

Sehingga persamaan gaya pegas untuk satu *hydro-pneumatic shock absorber* adalah sebagai berikut :

$$F_k = pA \quad (4.3)$$

Dimana p_0 , V_0 adalah tekanan gas awal (MPa) dan volume gas awal (m^3), p dan V adalah tekanan gas saat ini (MPa) dan volume gas saat ini (m^3), n adalah indeks adiabatik gas yaitu sebesar 1,1 untuk nitrogen, 1.3 untuk karbondioksida, dan 1.4 untuk udara kering. $x_s = (x_1 - x_2)$ merupakan *shock absorber stroke*/besar perpindahan batang piston (m). Kombinasi dari persamaan (4.1 - 4.3) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$F_k = p_0 A \left(\frac{V_0}{V} \right)^n = p_0 A \left(\frac{V_0}{V_0 - A(x_s)} \right)^n = p_0 A \left(\frac{V_0}{V_0 - A(x_1 - x_2)} \right)^n \quad (4.4)$$

4.1.2 Gaya Redam (Fd)

Gaya redam dipengaruhi oleh energi disipasi dari minyak yang mengalir melalui *orifice*. Minyak tersebut diasumsikan fluida inkompresibel dan p_l merepresentasikan perbedaan tekanan antara ruang bawah dan atas (MPa). Dari hukum konservasi massa dan persamaan Bernoulli, maka didapat persamaan sebagai berikut :

$$A(\dot{x}_s) = \xi A_0 v_l \quad (4.5)$$

$$p_l = \frac{1}{2} \rho (v_l^2 - (\dot{x}_s)^2) = \frac{1}{2} \rho (v_l^2 - (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2) \quad (4.6)$$

Parameter ξ merupakan koefisien *discharge orifice* yang didapatkan dari eksperimen, $A_0 = \pi D_{op}^2 / 4$ merupakan luas penampang *orifice* (m^2), v_l merupakan kecepatan minyak yang mengalir melalui *orifice* (m/s^2), $\dot{x}_s = (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$ merupakan kecepatan piston relatif terhadap daerah di luar silinder dari *hydro-pneumatic shock absorber* (m/s^2), dan ρ adalah densitas dari minyak (kg/m^3).

$$p_l = \frac{1}{2} \rho \left(\left(\frac{A}{\xi A_0} \right)^2 - 1 \right) (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 \quad (4.7)$$

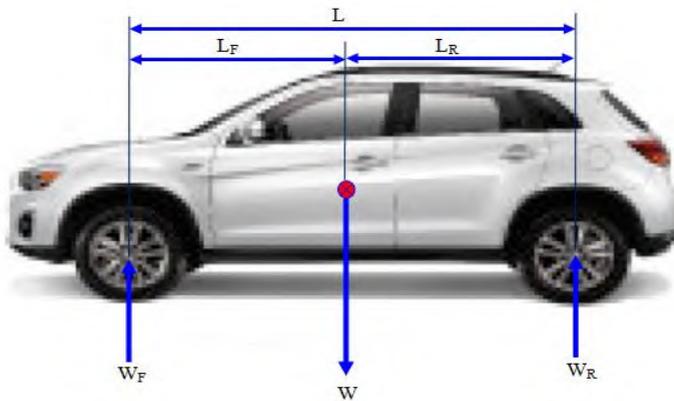
Sehingga persamaan gaya redam untuk satu buah *hydro-pneumatic shock absorber* adalah :

$$F_d = p_l A = \frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\xi A_0} \right)^2 - 1 \right) (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 \quad (4.8)$$

\dot{x}_s merupakan kecepatan piston relatif terhadap daerah di luar silinder dari *hydro-pneumatic shock absorber*. Apabila $\dot{x}_s = 0$, maka minyak berada pada kondisi statis dan tidak mengalir melalui *orifice* sehingga F_d bernilai nol.

4.2 Pemodelan Dinamis Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

Sebelum memodelkan dinamis terlebih dahulu mencari besarnya nilai m_{ap} yang dimodelkan dalam seperempat kendaraan, dengan asumsi bahwa m_{ap} adalah massa seperempat kendaraan bagian depan.



Gambar 4.2 *Free body diagram* kendaraan model *half-car*

Berdasarkan gambar 4.2, untuk mencari besarnya m_{ap} untuk seperempat kendaraan dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \Sigma F &= 0 \\
 W - W_R - W_F &= 0 \\
 W_F &= W - W_R
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

$$\begin{aligned}
 +\curvearrowright \Sigma M_o &= 0 \\
 W_R \cdot L - W \cdot L_F &= 0 \\
 W_R &= W \cdot \frac{L_F}{L}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

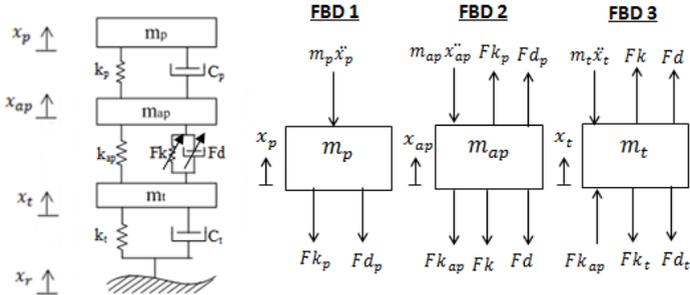
Kemudian persamaan (4.10) disubstitusikan ke dalam persamaan (4.9), sehingga menjadi sebagai berikut,

$$W_F = W - W \cdot \frac{L_F}{L} \tag{4.11}$$

dimana

- W : berat total kendaraan (kg)
- W_F : berat kendaraan bagian depan (kg)
- W_R : berat kendaraan bagian belakang (kg)
- L : jarak sumbu roda depan dan roda belakang (m)
- L_R : jarak sumbu roda belakang dari titik berat (m)
- L_F : jarak sumbu roda depan dari titik berat (m)

Dari model matematis yang telah dijelaskan pada gambar 3.8, akan didapatkan FBD sebagai berikut,



Gambar 4.3 FBD untuk sistem mobil dengan penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic*

Persamaan matematis dari FBD 1 pada gambar 4.3 adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 -Fk_p - Fd_p - m_p \ddot{x}_p &= 0 \\
 k_p(x_p - x_{ap}) + c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_{ap}) + m_p \ddot{x}_p &= 0 \\
 m_p \ddot{x}_p &= -k_p(x_p - x_{ap}) - c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_{ap}) \\
 \ddot{x}_p &= \frac{1}{m_p} [-k_p(x_p - x_{ap}) - c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_{ap})] \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

Persamaan *state variable* dari persamaan (4.12), yaitu:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_p &= v_p \\
 \dot{v}_p &= \frac{1}{m_p} [-k_p(x_p - x_{ap}) - c_p(v_p - v_{ap})]
 \end{aligned}$$

Persamaan matematis dari FBD 2 pada gambar 4.3 adalah sebagai berikut :

$$Fk_p + Fd_p - Fd_{ap} - Fk - Fd - m_{ap} \ddot{x}_{ap} = 0$$

$$\begin{aligned}
& k_p(x_p - x_{ap}) + c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_{ap}) - k_{ap}(x_{ap} - x_t) \\
& \quad - p_0 A \left(\frac{V_0}{V_0 - A(x_{ap} - x_t)} \right)^n \\
& \quad - \frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\xi A_0} \right)^2 - 1 \right) (\dot{x}_{ap} - \dot{x}_t)^2 - m_{ap} \ddot{x}_{ap} \\
& = 0 \\
m_{ap} \ddot{x}_{ap} & = k_p(x_p - x_{ap}) + c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_{ap}) - k_{ap}(x_{ap} - x_t) \\
& \quad - p_0 A \left(\frac{V_0}{V_0 - A(x_{ap} - x_t)} \right)^n \\
& \quad - \frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\xi A_0} \right)^2 - 1 \right) (\dot{x}_{ap} - \dot{x}_t)^2 \\
\ddot{x}_{ap} & = \frac{1}{m_{ap}} \left[k_p(x_p - x_{ap}) + c_p(\dot{x}_p - \dot{x}_{ap}) - k_{ap}(x_{ap} - x_t) \right. \\
& \quad - p_0 A \left(\frac{V_0}{V_0 - A(x_{ap} - x_t)} \right)^n \\
& \quad - \frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\xi A_0} \right)^2 \right. \\
& \quad \left. - 1 \right) (\dot{x}_{ap} \\
& \quad \left. - \dot{x}_t)^2 \right] \tag{4.13}
\end{aligned}$$

Persamaan *state variable* dari persamaan (4.13), yaitu:

$$\dot{x}_{ap} = v_{ap}$$

$$\begin{aligned}
\dot{v}_{ap} & = \frac{1}{m_{ap}} \left[k_p(x_p - x_{ap}) + c_p(v_p - v_{ap}) - k_{ap}(x_{ap} - x_t) \right. \\
& \quad - p_0 A \left(\frac{V_0}{V_0 - A(x_{ap} - x_t)} \right)^n \\
& \quad \left. - \frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\xi A_0} \right)^2 - 1 \right) (v_{ap} - v_t)^2 \right]
\end{aligned}$$

Persamaan matematis dari FBD 3 pada gambar 4.3 adalah sebagai berikut :

$$Fk + Fd + Fk_{ap} - Fk_t - Fd_t - m_t \ddot{x}_t = 0$$

$$p_0 A \left(\frac{V_0}{V_0 - A(x_{ap} - x_t)} \right)^n + \frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\xi A_0} \right)^2 - 1 \right) (\dot{x}_{ap} - \dot{x}_t)^2$$

$$+ k_{ap}(x_{ap} - x_t) - k_t(x_t - x_r) - c_t(\dot{x}_t - \dot{x}_r) - m_t \ddot{x}_t = 0$$

$$m_t \ddot{x}_t = p_0 A \left(\frac{V_0}{V_0 - A(x_{ap} - x_t)} \right)^n$$

$$+ \frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\xi A_0} \right)^2 - 1 \right) (\dot{x}_{ap} - \dot{x}_t)^2 + k_{ap}(x_{ap} - x_t) - k_t(x_t - x_r) - c_t(\dot{x}_t - \dot{x}_r)$$

$$\ddot{x}_t = \frac{1}{m_t} \left[p_0 A \left(\frac{V_0}{V_0 - A(x_{ap} - x_t)} \right)^n + \frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\xi A_0} \right)^2 - 1 \right) (\dot{x}_{ap} - \dot{x}_t)^2 + k_{ap}(x_{ap} - x_t) - k_t(x_t - x_r) - c_t(\dot{x}_t - \dot{x}_r) \right] \quad (4.14)$$

Persamaan *state variable* dari persamaan (4.14), yaitu:

$$\dot{x}_t = v_t$$

$$\dot{v}_t = \frac{1}{m_t} \left[p_0 A \left(\frac{V_0}{V_0 - A(x_{ap} - x_t)} \right)^n + \frac{1}{2} \rho A \left(\left(\frac{A}{\xi A_0} \right)^2 - 1 \right) (v_{ap} - v_t)^2 + k_{ap} (x_{ap} - x_t) - k_t (x_t - x_r) - c_t (v_t - v_r) \right]$$

4.3 Diagram Blok

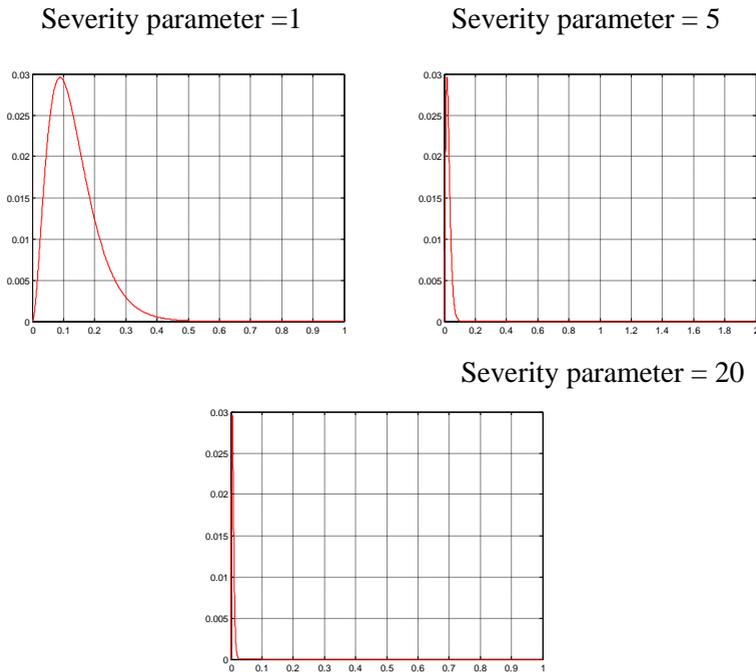
Dari persamaan gerak yang diperoleh, selanjutnya dibuat diagram blok yang sesuai dengan persamaan gerak dari masing-masing sistem. Dan dari diagram blok tersebut akan didapatkan grafik respon dari masing-masing sistem yang akan dibahas pada bab selanjutnya.

4.3.1 Input yang Digunakan

Pada tugas akhir ini, akan dilakukan simulasi untuk sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan system seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic*. Pada saat pemodelan pada program simulasi, digunakan dua macam input, yaitu pertama, input *bump* yang telah dimodifikasi yang akan menghasilkan respon transien. Kedua, input sinusoidal yang akan menghasilkan respon *steady-state*. Persamaan dari kedua input tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

- Input *bump* yang dimodifikasi

$$y(t) = Y 0.37 e^2 (\gamma \omega_0 t) e^{-\gamma \omega_0 t} \quad (4.15)$$

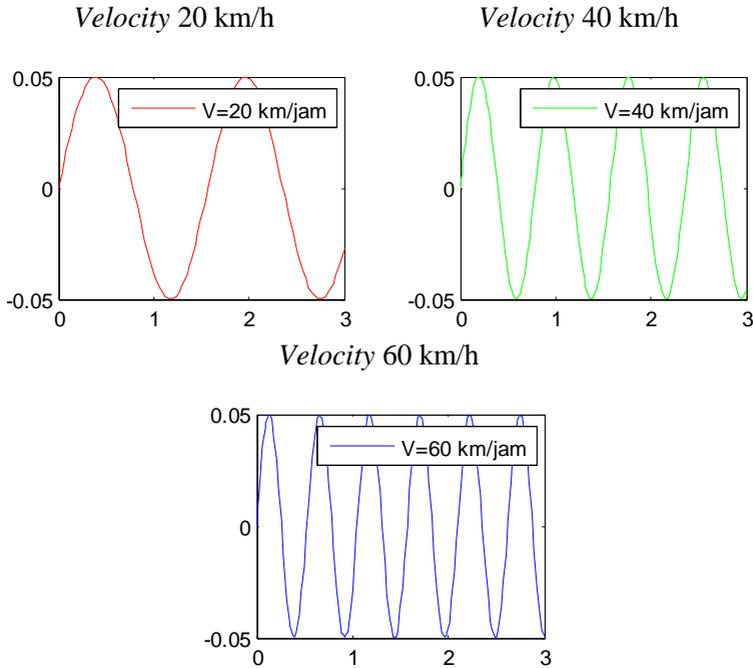


Gambar 4.4 Profil jalan dengan input *bump* yang dimodifikasi
(a) $\gamma = 1$ (b) $\gamma = 5$ (c) $\gamma = 20$

Input ini merupakan fungsi dari γ (*severity parameter*), yaitu 1 untuk *low impact* atau untuk kendaraan dengan kecepatan sekitar 7 km/jam, 5 untuk *less severe impacts* atau untuk kendaraan dengan kecepatan sekitar 36 km/jam, dan 20 untuk *more severe impact* atau untuk kendaraan dengan kecepatan sekitar 72 km/jam. Sedangkan ω_0 adalah $\sqrt{\frac{k_{ap}}{m_{ap}}}$. Nilai Y merupakan amplitudo yang digunakan. Amplitudo yang digunakan dalam simulasi yaitu 2 cm.

- Input sinusoidal

$$y(t) = Y \sin(\omega t) \quad (4.16)$$

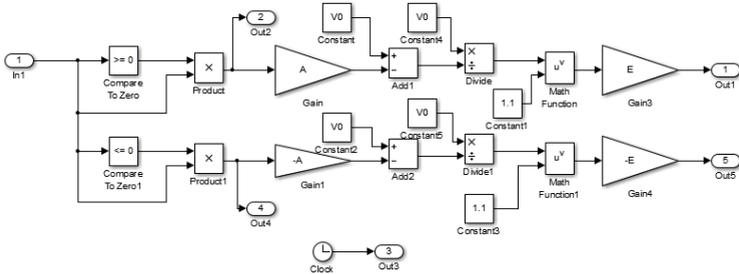


Gambar 4.5 Profil jalan dengan input sinusoidal

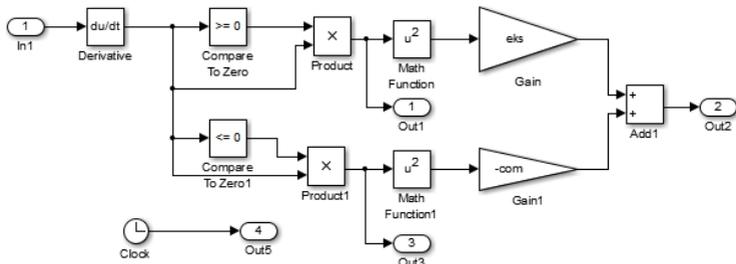
Pada persamaan (4.16), nilai Y merupakan amplitudo yang digunakan. Besar frekuensi akan divariasikan dengan amplitudo 2 cm dan panjang gelombang (λ) 10 m. Pada input sinusoidal tersebut digunakan tiga macam frekuensi yang masing-masing mewakili kecepatan kendaraan yang berbeda (20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam), menggunakan rumus $f = \frac{v}{\lambda}$. Untuk menghitung frekuensi (ω) input sinusoidal digunakan rumus $\omega = 2\pi f$

4.3.2 Diagram Blok Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

Untuk melakukan simulasi pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, hanya menggunakan input sinusoidal. Parameter yang digunakan pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* ini telah dijelaskan pada tabel 3.1.



Gambar 4.6 Diagram blok untuk gaya pegas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*

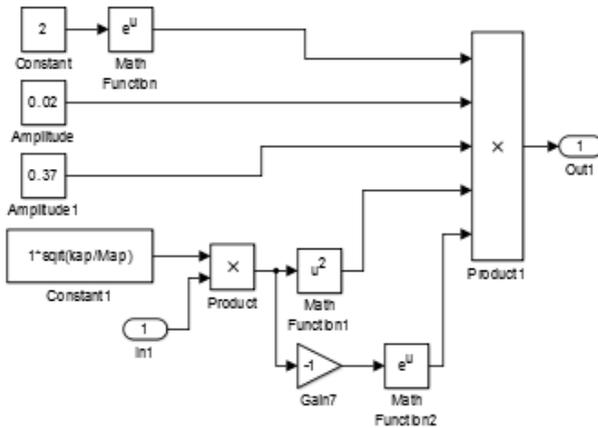


Gambar 4.7 Diagram blok untuk gaya redam pada sistem suspensi *hydro pneumatic*

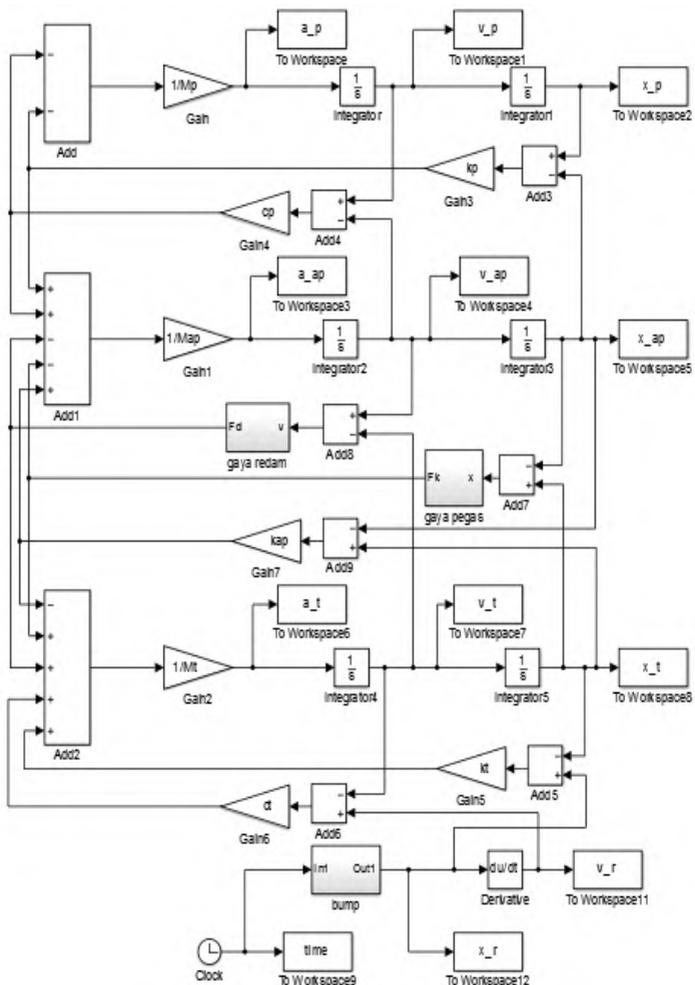
4.3.3 Diagram Blok Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

Pada sistem seperempat kendaraan mobil, nilai konstanta redaman pada massa seperempat kendaraan mobil digantikan

dengan nilai gaya redaman yang dihasilkan oleh sistem suspensi *hydro-pneumatic*. Sedangkan nilai konstanta pegas pada massa seperempat kendaraan mobil digantikan juga dengan nilai gaya pegas yang dihasilkan oleh sistem suspensi *hydro-pneumatic* ini. Input yang digunakan dalam simulasi sistem sistem seperempat kendaraan mobil, yaitu input sinusoidal dengan kecepatan mobil 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h dan input *bump* yang telah dimodifikasi dengan γ (*severity parameter*) sama dengan 1 untuk *low impact*, 5 untuk *less severe impacts*, dan 20 untuk *more severe impact*. Parameter yang digunakan pada sistem seperempat kendaraan mobil ini telah dijelaskan pada tabel 3.2.



Gambar 4.8 Diagram blok untuk input *bump modified*



Gambar 4.9 Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan mobil dengan input *bump modified*

BAB V

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Dalam pemodelan ini didapatkan respon dinamis dari sistem suspensi *hydro-pneumatic*, sistem seperempat kendaraan dengan penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan gaya tekan ban (*road holding*) akibat penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic*. Respon dinamis pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* yang dibahas pada bab ini adalah respon perpindahan dan kecepatan terhadap gaya redam, serta respon perpindahan terhadap gaya pegas yang dihasilkan oleh sistem suspensi *hydro-pneumatic*. Perlu diketahui bahwa pada grafik respon gaya redam dan gaya pegas yang dihasilkan, nilai positif adalah nilai pada kondisi ekspansi dan nilai negatif adalah nilai pada kondisi kompresi. Pada sistem seperempat kendaraan, respon dinamis yang dibahas adalah respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan getaran yang dialami oleh penumpang terhadap waktu, sedangkan untuk gaya tekan ban akibat penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic*, respon dinamis yang dibahas adalah respon perpindahan terhadap gaya tekan ban.

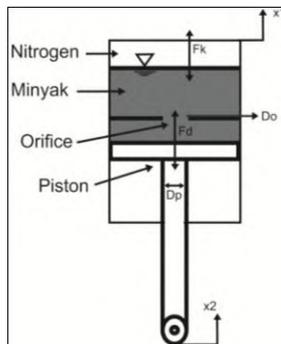
Hal pertama yang dilakukan dalam simulasi adalah pemilihan tekanan awal (p_0) dan volume awal (V_0) gas yang akan dijadikan parameter pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* ini. Pilihan parameter tersebut antara lain variasi tekanan awal gas (p_0) sebesar 1,2 MPa, 1,6 MPa, 2 MPa dengan volume awal gas nitrogen (V_0) konstan yaitu sebesar $8,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$. Pilihan selanjutnya yaitu variasi volume awal gas (V_0) sebesar $7,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, $8,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ dan $9,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ dengan tekanan awal gas (p_0) konstan yaitu sebesar 1,6 MPa. Setelah itu dipilih yang menghasilkan gaya pegas terbesar kemudian diaplikasikan pada sistem seperempat kendaraan mobil dan dianalisa respon dinamisnya.

Setelah memilih variasi dari tekanan awal (p_0) dan volume awal (V_0) gas, selanjutnya dilakukan pemilihan diameter *orifice*

(D_o) yang akan dijadikan parameter pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*. Variasi dari diameter *orifice* (D_o) yaitu sebesar 1 mm, 2 mm, dan 3 mm dengan tekanan awal (p_o) dan volume awal (V_o) gas konstan yaitu sebesar 1,6 MPa dan $8,854 \times 10^{-5} \text{ m}^3$. Setelah itu dipilih variasi diameter *orifice* (D_o) yang menghasilkan gaya redam terbesar kemudian diaplikasikan pada sistem seperempat kendaraan mobil dan dianalisa respon dinamisnya.

Pada tahap ketiga, sistem suspensi *hydro-pneumatic* diaplikasikan pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan input yang digunakan, yaitu input sinusoidal dan input *bump modified*. Dari kedua input ini didapatkan respon dinamis dari penumpang dan kendaraan dari mobil ini. Kemudian respon dinamis tersebut dibandingkan dengan kriteria kenyamanan berdasarkan besar percepaan RMS menurut ISO 2631. Pada tahap ini juga ditunjukkan respon dinamis dari gaya tekan ban (*road holding*) pada saat menapak jalan, dengan besarnya tekanan ban yang divariasikan yaitu sebesar 30 Psi dan 35 Psi.

5.1 Respon Dinamis Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic* pada Variasi Tekanan Awal Gas (p_o), Volume Awal Gas (V_o), dan Diameter *Orifice* (D_o) dengan Variasi Frekuensi



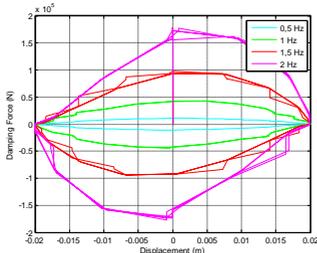
Gambar 5.1 Skema sistem suspensi *hydro-pneumatic*

Pada gambar 5.1 dapat dilihat skema dari silinder hidrolik yang divariasikan dengan frekuensi dari perpindahan batang piston. Setelah disimulasikan, dilakukan pemilihan tekanan awal gas (p_o), volume awal gas (V_o), diameter *orifice* (D_o) yang mana akan digunakan sebagai parameter pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*. Variasi yang dilakukan dijelaskan pada tabel 5.1.

Tabel 5.1 Parameter yang digunakan saat simulasi respon gaya redam pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, pada massa jenis minyak (ρ), diameter piston (D_p) dan diameter *orifice* (D_o) dengan variasi frekuensi

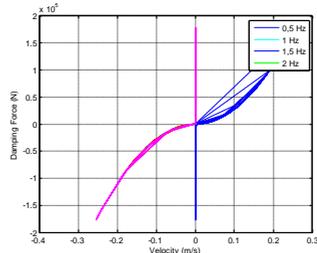
Massa Jenis Minyak (ρ)	Diameter Piston (D_p)	Diameter <i>Orifice</i> (D_o)	Frekuensi
860 kg/m ³	3 x 10 ⁻² m	1 x 10 ⁻³ m	0,5 Hz
			1 Hz
			1,5 Hz
			2 Hz
		2 x 10 ⁻³ m	0,5 Hz
			1 Hz
			1,5 Hz
			2 Hz
		3 x 10 ⁻³ m	0,5 Hz
			1 Hz
			1,5 Hz
			2 Hz

$D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}, D_o = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$



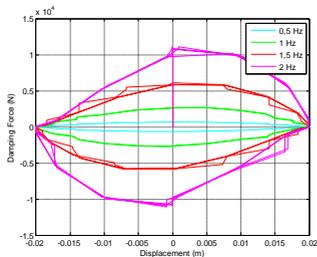
(a)

$D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}, D_o = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$



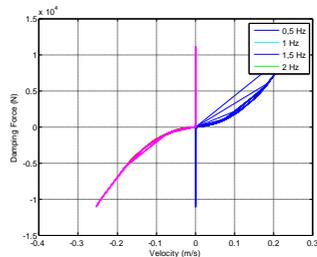
(b)

$D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}, D_o = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$



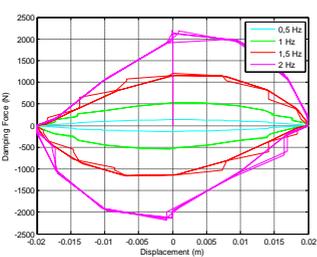
(c)

$D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}, D_o = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$



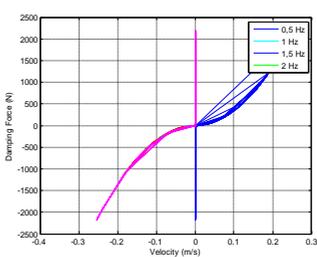
(d)

$D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}, D_o = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$



(e)

$D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}, D_o = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$



(f)

Gambar 5.2 Grafik respon perpindahan dan kecepatan terhadap gaya redam pada massa jenis minyak ($\rho=860 \text{ kg/m}^3$), diameter piston ($D_p = 3 \text{ cm}$) dan diameter orifice ($D_o = 1-3 \text{ mm}$) dengan variasi frekuensi

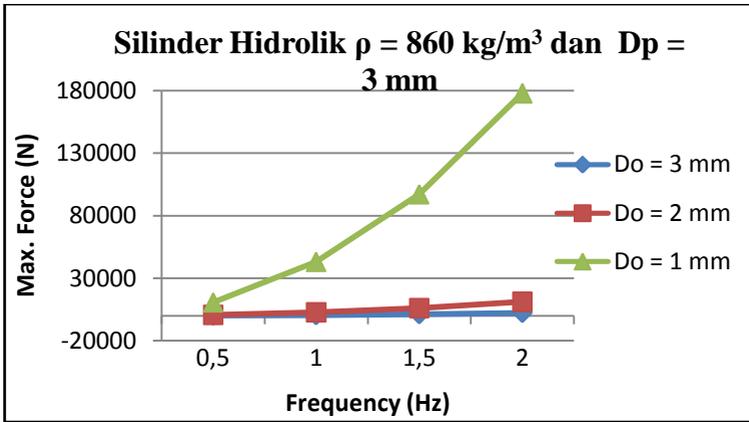
Gambar 5.2 merupakan grafik respon gaya redam terhadap perpindahan (a – c – e) dan kecepatan (b – d – f) pada massa jenis minyak ($\rho=860 \text{ kg/m}^3$), diameter piston ($D_p = 3 \text{ cm}$) dan diameter *orifice* ($D_o = 1-3 \text{ mm}$) dengan variasi frekuensi. Variasi frekuensi yang digunakan yaitu 0,5 Hz; 1 Hz; 1,5 Hz; 2 Hz.

Pada grafik respon gaya redam terhadap perpindahan terlihat dengan jelas bahwa semakin besar frekuensi, maka gaya redam yang dihasilkan semakin besar. Hal ini sesuai dengan teori bahwa frekuensi berbanding lurus dengan perpindahan maupun kecepatan, dan kecepatan juga berbanding lurus dengan gaya redam yang dihasilkan. Namun pada grafik respon gaya redam terhadap kecepatan tidak terlihat perbedaannya antara masing-masing frekuensi. Hanya *trend line* pada frekuensi 2 Hz saja yang terlihat. Hal ini dikarenakan pada frekuensi 0,5 Hz sampai 1 Hz memiliki trend line yang berhimpit dengan 2 Hz tetapi hanya berbeda pada nilai gaya redam yang dihasilkan.

Tabel 5.2 merupakan data nilai gaya redam maksimum yang dihasilkan sesuai dengan gambar 5.2. Dari data tersebut, dibuat grafik pengaruh variasi frekuensi terhadap gaya redam maksimum yang dihasilkan dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* dengan massa jenis minyak (ρ), diameter piston (D_p) dan diameter *orifice* (D_o), yaitu pada gambar 5.3.

Tabel 5.2 Nilai gaya redam maksimum untuk massa jenis minyak ($\rho=860 \text{ kg/m}^3$) dan diameter piston ($D_p = 3 \text{ cm}$) pada masing-masing diameter *orifice* ($D_o = 1-3 \text{ mm}$)

Diameter <i>Orifice</i> (D_o)	Gaya Redam			
	0,5 Hz	1 Hz	1,5 Hz	2 Hz
1 mm	10799 N	43198 N	97195 N	177880 N
2 mm	674,97 N	2699,9 N	6074,7 N	11117 N
3 mm	133,33 N	533,3 N	1199,9 N	2196 N



Gambar 5.3 Grafik pengaruh variasi frekuensi terhadap gaya redam maksimum yang dihasilkan dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* dengan massa jenis minyak ($\rho=860 \text{ kg/m}^3$) dan diameter piston ($D_p = 3 \text{ cm}$) pada masing-masing diameter *orifice* ($D_o = 1-3 \text{ mm}$)

Dari gambar 5.3, dapat dilihat pada setiap variasi diameter *orifice* (D_o) memiliki *trend line* yang sama yaitu semakin besar frekuensi, maka gaya redam yang dihasilkan semakin besar. Hal ini dikarenakan frekuensi berbanding lurus dengan perpindahan maupun kecepatan, kemudian perpindahan maupun kecepatan juga berbanding lurus dengan gaya redam yang dihasilkan (persamaan (4.8)). Pada grafik tersebut, dapat dilihat bahwa semakin kecil diameter *orifice* (D_o) yang digunakan, maka gaya redam yang dihasilkan semakin besar. Hal ini sesuai dengan persamaan gaya redam yang digunakan pada silinder hidrolik (persamaan (4.8)) yaitu kuadrat luas penampang *orifice* (A_o^2) berbanding terbalik dengan gaya redam yang dihasilkan (F_d). Gaya redam yang dihasilkan oleh sistem suspensi *hydro-pneumatic* akan semakin besar apabila semakin besar frekuensi dari perpindahan batang piston, dan semakin kecil diameter *orifice*

(A_o). Hal tersebut sesuai dengan persamaan gaya redam pada silinder hidrolik yang digunakan (persamaan (4.8)).

Untuk pemilihan dari diameter *orifice* (A_o) yang digunakan sebagai parameter sistem suspensi *hydro-pneumatic* saat dipasangkan pada sistem seperempat kendaraan, dipilih diameter *orifice* yang dapat menghasilkan gaya redam terbesar, yaitu pada saat massa jenis minyak $\rho=860 \text{ kg/m}^3$, diameter *orifice* $D_o = 1 \text{ mm}$, diameter piston $D_p = 3 \text{ cm}$ pada gambar 5.2 (a) dan (b) pada kondisi berjalan.

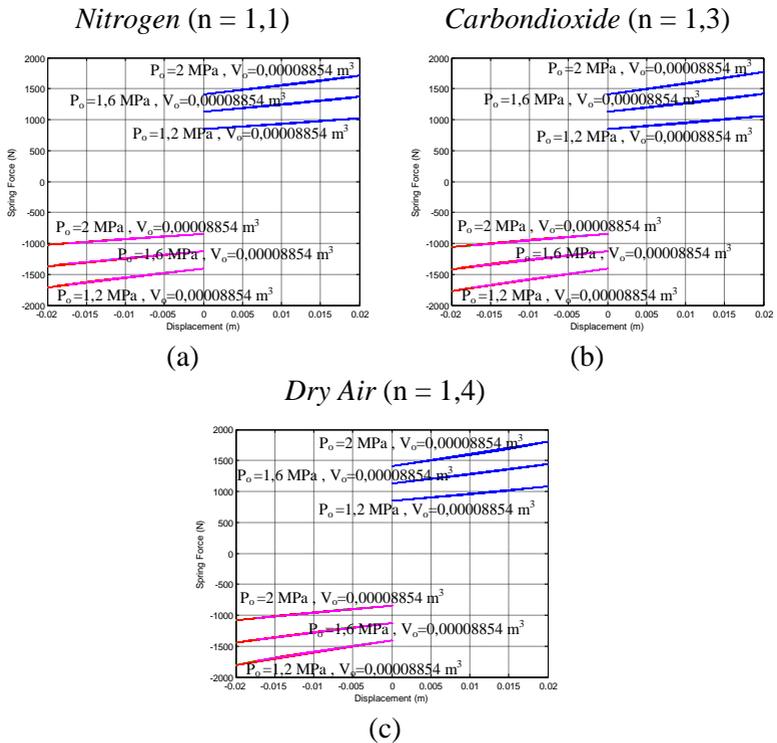
Tabel 5.3 Parameter yang digunakan saat simulasi respon gaya pegas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, pada diameter piston (D_p), volume awal gas (V_o), dan tekanan awal gas (p_o) dengan variasi frekuensi

Diameter Piston (D_p)	Volume Awal Gas (V_o)	Tekanan Awal Gas (p_o)	Frekuensi
$3 \times 10^{-2} \text{ m}$	$0,00008854 \text{ m}^3$	1200000 Pa	0,5 Hz
			1 Hz
			1,5 Hz
			2 Hz
		1600000 Pa	0,5 Hz
			1 Hz
			1,5 Hz
			2 Hz
		2000000 Pa	0,5 Hz
			1 Hz
			1,5 Hz
			2 Hz

Gambar 5.4 merupakan grafik respon gaya pegas terhadap perpindahan (a – b – c) pada diameter piston ($D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$), volume awal gas ($V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$), dan tekanan awal gas ($p_o = 1,2 \text{ MPa} - 2 \text{ MPa}$) untuk berbagai jenis gas dengan variasi

frekuensi. Variasi frekuensi yang digunakan yaitu 0,5 Hz; 1 Hz; 1,5 Hz; 2 Hz.

Pada ketiga grafik tersebut tidak terlihat jelas perbedaan antara respon gaya pegas terhadap perpindahan pada masing masing frekuensi. Hanya *trend line* pada frekuensi 0,5 Hz sampai 1,5 Hz saja yang terlihat. Hal ini dikarenakan pada frekuensi 2 Hz memiliki *trend line* yang berhimpit dengan frekuensi 0,5 Hz sampai 1,5 Hz, tetapi hanya berbeda pada nilai gaya pegas yang dihasilkan. Pada frekuensi 0,5 Hz sampai 1,5 Hz baik saat ekspansi maupun kompresi memiliki nilai gaya pegas yang sama, namun nilainya akan turun pada saat frekuensi 2 Hz. Dari masing-masing grafik dapat dilihat bahwa semakin besar tekanan awal gas (p_o) yang digunakan, maka gaya pegas yang dihasilkan semakin besar. Pada saat sistem suspensi menggunakan $p_o = 2$ MPa, maka sistem ini akan menghasilkan gaya pegas paling besar untuk setiap jenis gas, yaitu dengan gas nitrogen akan menghasilkan gaya pegas maksimum sebesar 1711,9 N, dengan gas karbondioksida akan menghasilkan gaya pegas sebesar 1772,5 N, dan dengan udara kering menghasilkan gaya pegas maksimum sebesar 1803,6 N. Hal ini sesuai dengan persamaan gaya pegas yang digunakan pada silinder hidrolik (persamaan (4.4)), yaitu tekanan awal gas (p_o) berbanding lurus dengan gaya pegas yang dihasilkan (F_k). Gaya pegas yang dihasilkan oleh sistem suspensi *hydro-pneumatic* akan semakin besar apabila frekuensi dari perpindahan batang piston semakin besar, dan semakin besar tekanan awal gas (p_o) pada silinder hidrolik. Hal ini sesuai dengan persamaan gaya pegas pada silinder hidrolik yang digunakan (persamaan (4.4)).



Gambar 5.4 Grafik respon perpindahan terhadap gaya pegas pada diameter piston ($D_p = 3 \times 10^{-2}$ m), volume awal gas ($V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$), dan tekanan awal gas ($p_o = 1,2 \text{ MPa} - 2 \text{ MPa}$) untuk berbagai jenis gas dengan variasi frekuensi

Tabel 5.4 Nilai gaya pegas maksimum untuk semua jenis gas dengan diameter piston ($D_p = 3 \times 10^{-2}$ m) dan volume awal gas ($V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$) pada masing-masing tekanan awal gas ($p_o = 1,2 \text{ MPa} - 2 \text{ MPa}$) dengan variasi frekuensi

Jenis Gas	Tekanan Awal Gas (p_o)	Gaya Pegas (N)			
		0,5 Hz	1 Hz	1,5 Hz	2 Hz
<i>Nitrogen</i>	1,2 MPa	1027 N	1027 N	1027 N	999 N
	1,6 MPa	1369 N	1369,5 N	1369,5 N	1332,1 N
	2 MPa	1712 N	1711,9 N	1711,9 N	1665,2 N
<i>Carbondioxide</i>	1,2 MPa	1064 N	1063,5 N	1063,5 N	1029,3 N
	1,6 MPa	1418 N	1418 N	1418 N	1372,4 N
	2 MPa	1772,5 N	1772,5 N	1772,5 N	1715,5 N
<i>Dry Air</i>	1,2 MPa	1082,1 N	1082,1 N	1082,1 N	1044,7 N
	1,6 MPa	1442,9 N	1442,9 N	1442,9 N	1393 N
	2 MPa	1803,6 N	1803,6 N	1803,6 N	1741,2 N

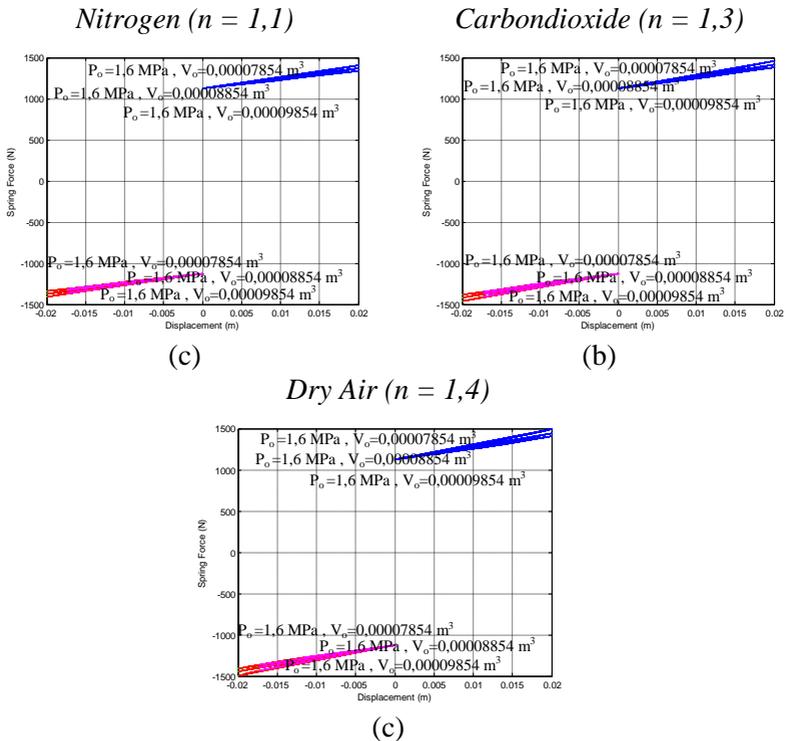
Untuk pemilihan tekanan awal gas (p_o) yang digunakan, dipilih tekanan awal gas yang dapat menghasilkan gaya pegas paling besar, yaitu saat diameter piston $D_p = 3 \times 10^{-2}$ m, volume awal gas $V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$, dan tekanan awal gas $p_o = 2 \text{ MPa}$ pada masing-masing jenis gas.

Tabel 5.5 Parameter yang digunakan respon gaya pegas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, pada diameter piston (D_p), tekanan awal gas (p_o), dan volume awal gas (V_o), dan dengan variasi frekuensi

Diameter Piston (D_p)	Tekanan Awal Gas (p_o)	Volume Awal Gas (V_o)	Frekuensi
$3 \times 10^{-2} \text{ m}$	1600000 Pa	$0,00007854 \text{ m}^3$	0,5 Hz
			1 Hz
			1,5 Hz
			2 Hz
		$0,00008854 \text{ m}^3$	0,5 Hz
			1 Hz
			1,5 Hz
			2 Hz
		$0,00009854 \text{ m}^3$	0,5 Hz
			1 Hz
			1,5 Hz
			2 Hz

Gambar 5.5 merupakan grafik respon gaya pegas terhadap perpindahan (a – b – c) pada diameter piston ($D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$), tekanan awal gas ($p_o = 1,6 \text{ MPa}$), dan volume awal gas ($V_o = 0,00007854 - 0,00009854 \text{ m}^3$) dengan variasi frekuensi. Variasi frekuensi yang digunakan yaitu 0,5 Hz; 1 Hz; 1,5 Hz; 2 Hz.

Pada ketiga grafik tersebut tidak terlihat jelas perbedaan antara respon gaya pegas terhadap perpindahan pada masing masing frekuensi. Hanya *trend line* pada frekuensi 0,5 Hz sampai 1,5 Hz saja yang terlihat. Hal ini dikarenakan pada frekuensi 2 Hz memiliki *trend line* yang berhimpit dengan frekuensi 0,5 Hz sampai 1,5 Hz, tetapi hanya berbeda pada nilai gaya pegas yang dihasilkan. Pada frekuensi 0,5 Hz sampai 1,5 Hz baik saat ekspansi maupun kompresi memiliki nilai gaya pegas yang sama, namun nilainya akan turun pada saat frekuensi 2 Hz.



Gambar 5.5 Grafik respon gaya pegas terhadap perpindahan pada diameter piston ($D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$), tekanan awal gas ($p_o = 1,6 \text{ MPa}$), dan volume awal gas ($V_o = 0,00007854 - 0,00009854 \text{ m}^3$) dengan variasi frekuensi

Dari masing-masing grafik dapat dilihat bahwa semakin besar volume awal gas (V_o) yang digunakan, maka gaya pegas yang dihasilkan semakin kecil. Terlihat pada saat sistem suspensi menggunakan gas nitrogen dengan $V_o = 0,00007854 \text{ m}^3$, maka sistem ini akan menghasilkan gaya pegas maksimum sebesar 1406,9 N dan kemudian turun menjadi 1341 N saat $V_o = 0,00009854 \text{ m}^3$, dan begitu pula saat menggunakan jenis gas lain.

Hal ini sesuai dengan persamaan gaya pegas yang digunakan pada silinder hidrolik (persamaan (4.4)), yaitu volume awal gas (V_o) berbanding terbalik dengan gaya pegas yang dihasilkan (F_k). Gaya pegas yang dihasilkan oleh sistem suspensi *hydro-pneumatic* akan semakin besar apabila frekuensi dari perpindahan batang piston semakin besar, dan semakin kecil volume awal gas (V_o) pada silinder hidrolik. Hal ini sesuai dengan persamaan gaya pegas pada silinder hidrolik yang digunakan (persamaan (4.4)).

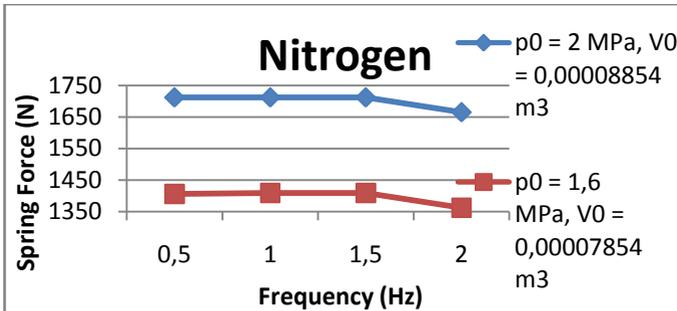
Tabel 5.6 Nilai gaya pegas maksimum untuk semua jenis gas pada diameter piston ($D_p = 3 \times 10^{-2}$ m) dan tekanan awal gas ($p_o = 1,6$ MPa) pada masing-masing volume awal gas (V_o) dengan variasi frekuensi

Jenis Gas	Volume Awal Gas (V_o)	Gaya Pegas (N)			
		0,5 Hz	1 Hz	1,5 Hz	2 Hz
<i>Nitrogen</i>	0,0000785 4 m ³	1407 N	1406. 9 N	1406. 9 N	1362. 7 N
	0,0000885 4 m ³	1369. 5 N	1369. 5 N	1369. 5 N	1332. 1 N
	0,0000985 4 m ³	1341 N	1341 N	1341 N	1308. 7 N
<i>Carbondioxid e</i>	0,0000785 4 m ³	1463. 8 N	1463. 8 N	1463. 8 N	1409. 7 N
	0,0000885 4 m ³	1418 N	1418 N	1418 N	1372. 4 N
	0,0000985 4 m ³	1383. 2 N	1383. 2 N	1383. 2 N	1343. 9 N
<i>Dry Air</i>	0,0000785 4 m ³	1493. 2 N	1493. 2 N	1493. 2 N	1433. 8 N
	0,0000885 4 m ³	1442. 9 N	1442. 9 N	1442. 9 N	1393 N
	0,0000985 4 m ³	1404. 8 N	1404. 8 N	1404. 8 N	1361. 8 N

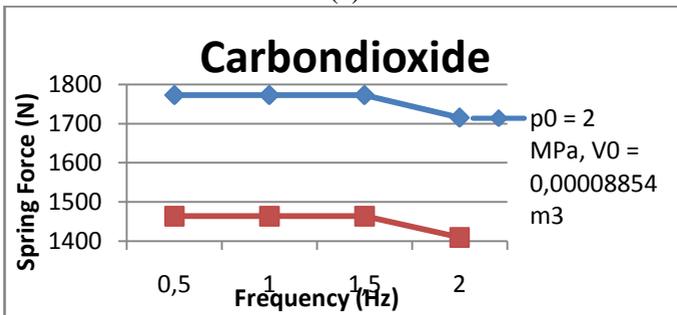
Untuk pemilihan volume awal gas (V_o) yang digunakan, dipilih volume awal gas yang dapat menghasilkan gaya pegas paling besar, yaitu saat diameter piston $D_p = 3 \times 10^{-2}$ m, volume awal gas $V_o = 0,00007854 \text{ m}^3$, dan tekanan awal gas $p_o = 1,6$ MPa pada masing-masing jenis gas.

Perbandingan gaya pegas antara variasi tekanan awal gas (p_o) dengan variasi volume awal gas (V_o) pada setiap jenis gas

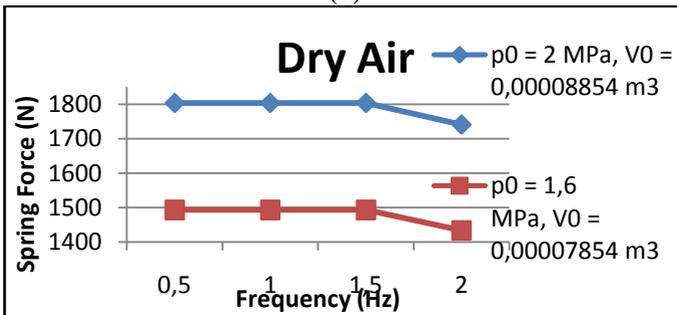
Dari hasil simulasi sistem suspensi *hydro-pneumatic* yang akan menghasilkan gaya pegas, pada variasi tekanan awal gas ($p_o = 1,2 - 2$ MPa) dengan volume awal gas konstan ($V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$) dipilih parameter terbaik yaitu ketika $p_o = 2$ MPa. Sedangkan pada variasi volume awal gas ($V_o = 0,00007854 - 0,00009854 \text{ m}^3$) dengan tekanan awal gas konstan ($p_o = 1,6$ MPa) dipilih parameter terbaik yaitu ketika $V_o = 0,00007854 \text{ m}^3$. Dari kedua parameter terbaik tersebut akan dibuat grafik perbandingan pengaruh variasi frekuensi terhadap gaya pegas maksimum yang dihasilkan dari sistem suspensi terhadap gaya pegas maksimum yang dihasilkan dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kondisi saat berjalan. Perbandingan antara kedua parameter terbaik tersebut dilakukan pada setiap jenis gas (nitrogen, karbondioksida, dan udara kering), kemudian akan dipilih salah satu yang mampu menghasilkan gaya pegas terbesar dan akan dijadikan sebagai parameter pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* ketika dipasangkan pada sistem seperempat kendaraan mobil.



(a)



(b)



(c)

Gambar 5.6 Grafik Perbandingan pengaruh variasi frekuensi terhadap gaya pegas maksimum yang dihasilkan dari sistem suspensi *hydro-pneumatic* antara variasi tekanan awal gas dengan variasi volume awal gas

Dari gambar 5.6, dapat dilihat bahwa variasi tekanan awal gas ($p_o = 2 \text{ MPa}$, $V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$) dan variasi volume awal gas ($p_o = 1,6 \text{ MPa}$, $V_o = 0,00007854 \text{ m}^3$) memiliki *trend line* yang sama untuk masing-masing gas, yaitu terlihat konstan pada frekuensi antara 0,5 – 1,5 Hz dan menurun pada saat frekuensi mencapai 2 Hz. Hal ini dikarenakan perbedaan nilai gaya pegas pada frekuensi 0,5 – 1,5 Hz sangat kecil.

Jika dilihat pada setiap jenis gas maka variasi tekanan awal gas ($p_o = 2 \text{ MPa}$, $V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$) menghasilkan gaya pegas yang lebih besar dibandingkan dengan variasi volume awal gas ($p_o = 1,6 \text{ MPa}$, $V_o = 0,00007854 \text{ m}^3$). Maka dari itu variasi yang dipilih untuk digunakan sebagai parameter pada sistem seperempat kendaraan mobil yaitu variasi yang menghasilkan gaya pegas terbear pada setiap jenis gas, agar mampu meredam getaran dengan maksimal. Sehingga dipilih diameter piston $D_p = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$, tekanan awal gas $p_o = 2 \text{ MPa}$ dan volume awal gas $V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$.

5.2 Respon Dinamis Kendaraan dari Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

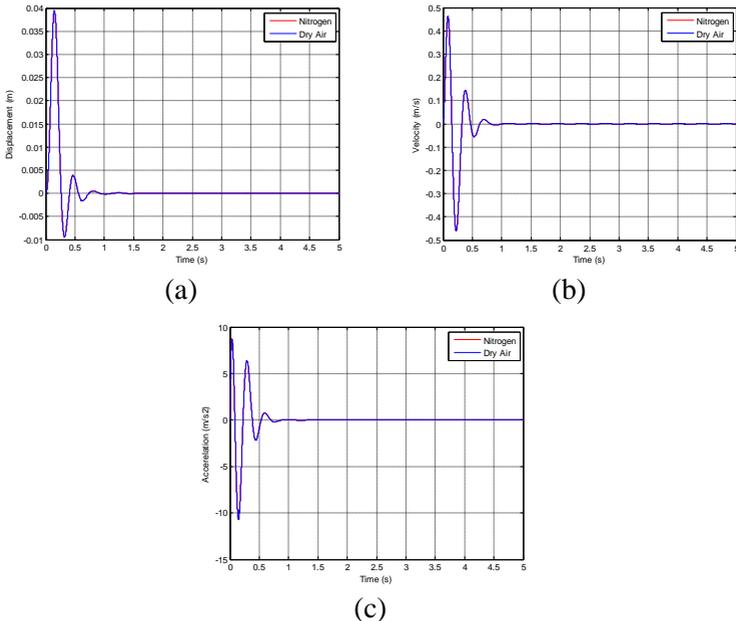
Setelah dilakukan simulasi pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, sistem suspensi tersebut diaplikasikan pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan input yang digunakan, yaitu input *bump modified* dan input sinusoidal. Input *bump modified* digunakan untuk melihat respon *transient* sistem seperempat kendaraan akibat beban *impact*, dan input sinusoidal digunakan untuk melihat respon dinamis sistem seperempat kendaraan akibat beban harmonik. Untuk sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut digunakan spesifikasi pada silinder hidrolis, yaitu massa jenis minyak $\rho = 860 \text{ kg/m}^3$, diameter piston $D = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$, diameter *orifice* $D_o = 1 \times 10^{-2} \text{ m}$, volume awal gas $V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$, dan variasi tekanan awal gas $p_o = 2 \text{ MPa}$ dan 1,2 MPa. Selain itu

digunakan dua variasi gas pada silinder hidrolik yaitu nitrogen ($n = 1,1$) dan udara kering ($n = 1,4$) sebagai penghasil gaya pegas.

5.2.1 Variasi Jenis Gas

5.2.1.1 Input *Bump* yang Dimodifikasi

- Severity Parameter = 1



Gambar 5.7 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$), dengan variasi jenis gas

Gambar 5.7 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$). Dari ketiga

grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 1,5 detik. Pada grafik respon perpindahan 5.7 (a) dan tabel 5.7, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0395 m saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon kecepatan 5.7 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,4637 m/s saat menggunakan nitrogen dan 0,4636 m/s saat menggunakan udara kering. Pada grafik respon percepatan 5.7 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 8,7394 m/s² saat menggunakan nitrogen dan 8,7391 m/s² saat menggunakan udara kering. Pada tabel 5.7 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan pada kendaraan terjadi saat menggunakan nitrogen maupun udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, sedangkan nilai maksimum kecepatan dan percepatan pada kendaraan terjadi saat menggunakan nitrogen sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan terlihat berhimpit.

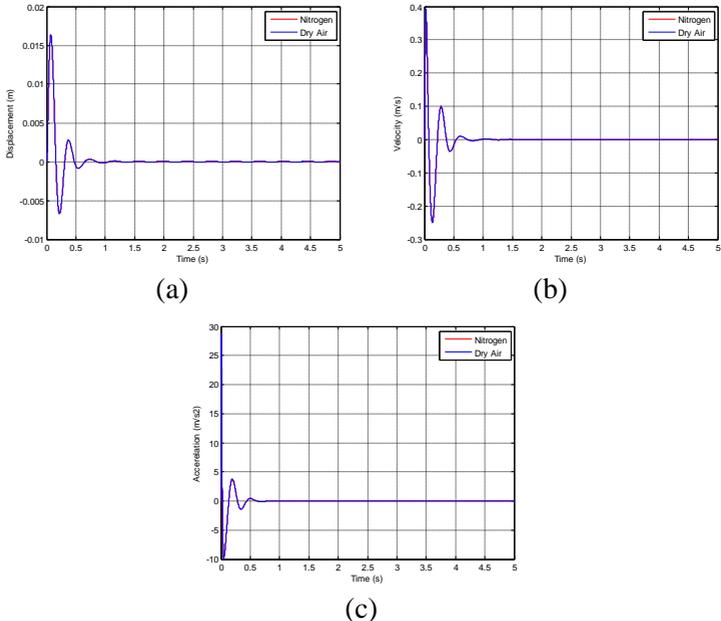
Tabel 5.7 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$), dengan variasi jenis gas

Jenis Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	<i>Settling time</i> (detik)
Nitrogen	0.0395	0.4637	8.7394	1,5
Udara kering	0.0395	0.4636	8.7391	1,5

Dari kedua jenis gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai perpindahan, kecepatan dan percepatan pada kendaraan sangat kecil dan bisa dikatakan berhimpit. Apabila dibandingkan antara kedua jenis gas yang dipakai pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut, maka sebaiknya menggunakan udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena

harganya yang paling murah dibandingkan dengan nitrogen dan ketersediannya yang melimpah di alam.

- **Severity Parameter = 5**



Gambar 5.8 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$), dengan variasi jenis gas

Gambar 5.8 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$). Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 2 detik. Pada grafik respon perpindahan 5.8 (a) dan tabel 5.8, nilai maksimum

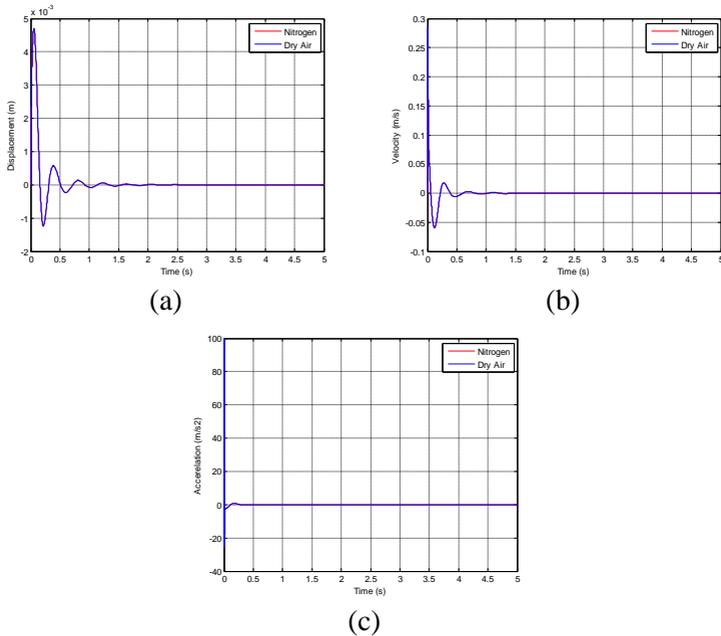
perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0163 m saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon kecepatan 5.8 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,3934 m/s saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon percepatan 5.8 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 28,6599 m/s² saat menggunakan nitrogen dan 28,6598 m/s² saat menggunakan udara kering. Pada tabel 5.8 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan, kecepatan dan percepatan pada kendaraan terjadi saat menggunakan nitrogen dan udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan terlihat berhimpit.

Dari kedua jenis gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai perpindahan, kecepatan dan percepatan pada kendaraan sangat kecil dan bisa dikatakan berhimpit. Dan apabila dibandingkan antara kedua jenis gas yang dipakai pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut, maka sebaiknya menggunakan udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena harganya yang paling murah dibandingkan dengan nitrogen dan ketersediannya yang melimpah di alam.

Tabel 5.8 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$), dengan variasi jenis gas

Jenis Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	<i>Settling time</i> (detik)
Nitrogen	0.0163	0.3934	28.6599	2
Udara kering	0.0163	0.3934	28.6598	2

• Severity Parameter = 20



Gambar 5.9 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$), dengan variasi jenis gas

Gambar 5.9 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$). Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 2 detik. Pada grafik respon perpindahan 5.9 (a) dan tabel 5.9, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0047 m saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon kecepatan 5.9 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,2839 m/s

saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon percepatan 5.9 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 99,7914 m/s^2 saat menggunakan nitrogen dan 99,7813 m/s^2 saat menggunakan udara kering. Pada tabel 5.9 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan, kecepatan dan percepatan pada kendaraan terjadi saat menggunakan nitrogen dan udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan terlihat berhimpit.

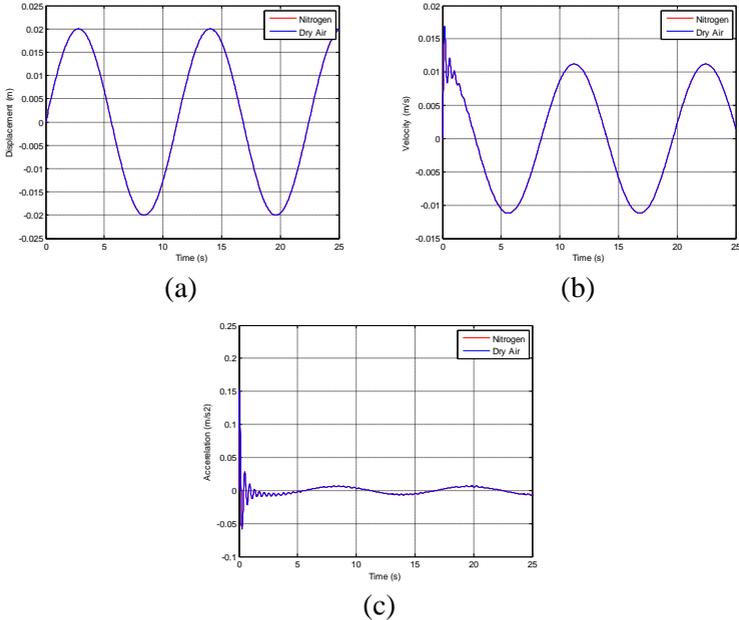
Dari kedua jenis gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai perpindahan, kecepatan dan percepatan pada kendaraan sangat kecil dan bisa dikatakan berhimpit. Dan apabila dibandingkan antara kedua jenis gas yang dipakai pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut, maka sebaiknya menggunakan udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena harganya yang paling murah dibandingkan dengan nitrogen dan ketersediannya yang melimpah di alam.

Tabel 5.9 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$), dengan variasi jenis gas

Jenis Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s^2)	<i>Settling time</i> (detik)
Nitrogen	0.0047	0.2839	99.7914	2
Udara kering	0.0047	0.2839	99.7813	2

5.2.1.2 Input Sinusoidal

- Kecepatan 20 km/jam



Gambar 5.10 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/jam), dengan variasi jenis gas

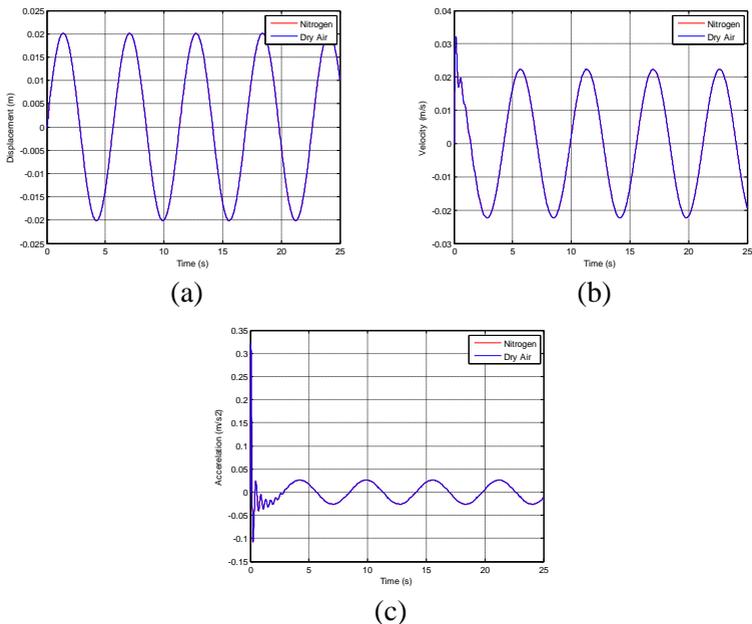
Gambar 5.10 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan kendaraan terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kecepatan mobil saat mencapai 20 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Dari ketiga grafik tersebut respon yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 3 detik. Pada grafik respon perpindahan, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu

sebesar 0,02 m saat menggunakan nitrogen, maupun udara kering. Pada grafik respon kecepatan, nilai maksimum kecepatan sebesar 0,0169 m/s saat menggunakan nitrogen dan 0,0168 m/s saat menggunakan udara kering. Pada grafik respon percepatan nilai maksimum percepatan sebesar 0,0129 m/s² saat menggunakan nitrogen, dan 0,0128 m/s² saat menggunakan udara kering. Dilihat dari *trend line*-nya ketiga grafik ini berhimpit pada respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan. Maka dari itu sebaiknya menggunakan udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena harganya yang paling murah dibandingkan dengan nitrogen dan ketersediannya yang melimpah di alam.

Tabel 5.10 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/jam), dengan variasi jenis gas

Jenis Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	Percepatan RMS dari getaran (m/s ²)	Settling time (detik)
Nitrogen	0.02	0.0169	0.1515	0.0129	3
Udara kering	0.02	0.0168	0.1511	0.0128	3

- Kecepatan 40 km/jam



Gambar 5.11 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/h), dengan variasi jenis gas

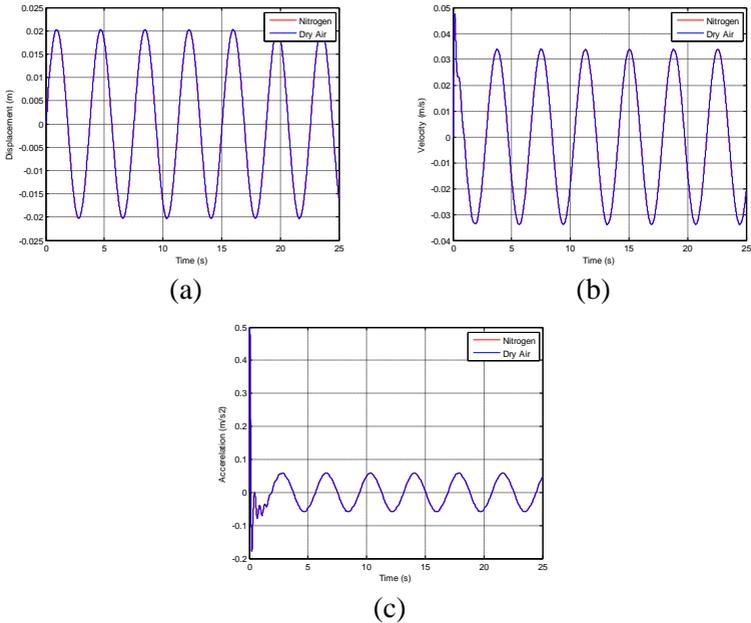
Gambar 5.11 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan kendaraan terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kecepatan mobil saat mencapai 40 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Dari ketiga grafik tersebut respon yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 2,5 detik. Pada grafik respon perpindahan, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,02 m saat menggunakan nitrogen, maupun udara kering.

Pada grafik respon kecepatan, nilai maksimum kecepatan sebesar 0,0321 m/s saat menggunakan nitrogen dan 0,032 m/s saat menggunakan udara kering. Pada grafik respon percepatan nilai maksimum percepatan sebesar 0,3206 m/s² saat menggunakan nitrogen, dan 0,3203 m/s² saat menggunakan udara kering. Dilihat dari *trend line*-nya ketiga grafik ini berhimpit pada respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan. Maka dari itu sebaiknya menggunakan udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena harganya yang paling murah dibandingkan dengan nitrogen dan ketersediannya yang melimpah di alam.

Tabel 5.11 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/h), dengan variasi jenis gas

Jenis Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	Percepatan RMS dari getaran (m/s ²)	<i>Settling time</i> (detik)
Nitrogen	0.0201	0.0321	0.3206	0.0372	2,5
Udara kering	0.0201	0.0320	0.3203	0.0370	2,5

- **Kecepatan 60 km/jam**



Gambar 5.12 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/h), dengan variasi jenis gas

Gambar 5.12 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan kendaraan terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kecepatan mobil saat mencapai 60 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Dari ketiga grafik tersebut respon yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 1,5 detik. Pada grafik respon perpindahan, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0203 m saat menggunakan nitrogen, maupun udara

kering. Pada grafik respon kecepatan, nilai maksimum kecepatan sebesar 0,0475 m/s saat menggunakan nitrogen dan 0,0474 m/s saat menggunakan udara kering. Pada grafik respon percepatan nilai maksimum percepatan sebesar 0,4993 m/s² saat menggunakan nitrogen, dan 0,4988 m/s² saat menggunakan udara kering. Dilihat dari *trend line*-nya ketiga grafik ini berhimpit pada respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan. Maka dari itu sebaiknya menggunakan udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena harganya yang paling murah dibandingkan dengan nitrogen dan ketersediannya yang melimpah di alam.

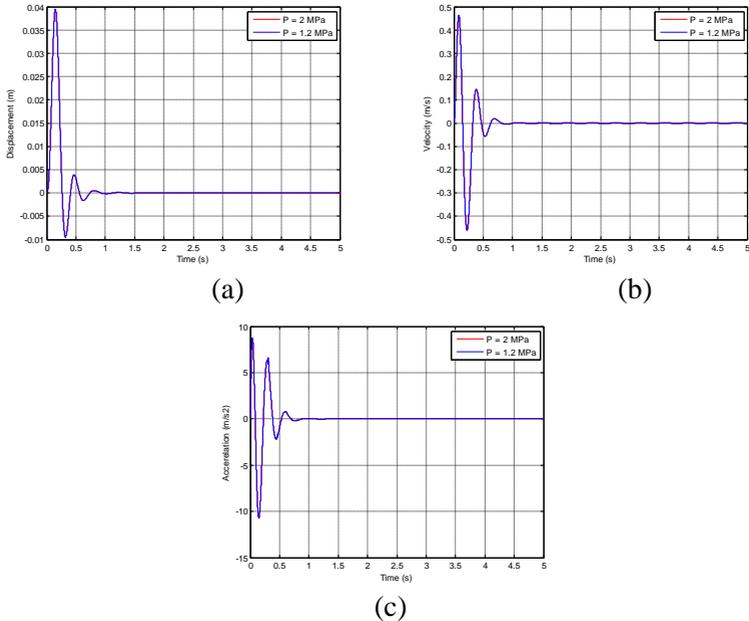
Tabel 5.12 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/h), dengan variasi jenis gas

Jenis Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	Percepatan RMS dari getaran (m/s ²)	<i>Settling time</i> (detik)
Nitrogen	0.0203	0.0475	0.4993	0.0676	1,5
Udara kering	0.0203	0.0474	0.4988	0.0675	1,5

5.2.2 Variasi Tekanan Awal Gas

5.2.2.1 Input *Bump* yang Dimodifikasi

- Severity Parameter = 1



Gambar 5.13 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$), dengan variasi tekanan awal gas

Gambar 5.13 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$). Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik. Pada grafik respon perpindahan 5.13 (a) dan tabel 5.13, nilai maksimum

perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0395 m saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon kecepatan 5.13 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,4636 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 0,4637 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada grafik respon percepatan 5.13 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 8,7507 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 8,7512 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada tabel 5.13 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan pada kendaraan terjadi saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa maupun 1,2 MPa sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, sedangkan nilai maksimum kecepatan dan percepatan pada kendaraan terjadi saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa sebagai tekanan awal gas dari fluida kerja pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan terlihat berhimpit

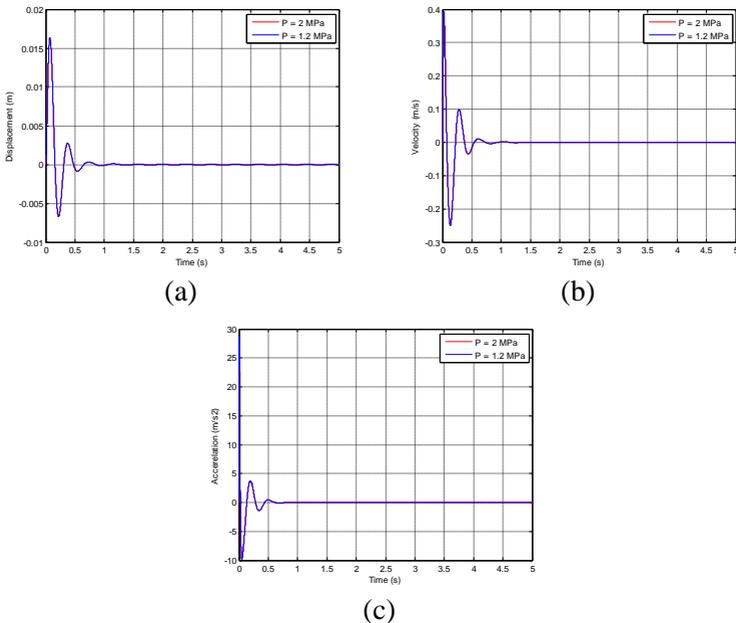
Tabel 5.13 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$), dengan variasi tekanan awal gas

Tekanan Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	<i>Settling time</i> (detik)
P = 2 MPa	0.0395	0.4636	8.7507	1
P = 1.2 MPa	0.0395	0.4637	8.7512	1

Dari kedua variasi tekanan awal gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai perpindahan, kecepatan dan percepatan pada kendaraan sangat kecil dan bisa dikatakan berhimpit. Dan apabila dibandingkan antara kedua variasi tekanan gas yang dipakai pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut, maka

sebaiknya menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena energi yang digunakan untuk mengkompresi tekanan 1,2 MPa lebih kecil daripada tekanan 2 MPa

- **Severity Parameter = 5**



Gambar 5.14 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$), dengan variasi tekanan awal gas

Gambar 5.14 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$). Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 1,5 detik. Pada grafik

respon perpindahan 5.14 (a) dan tabel 5.14, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0163 m saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon kecepatan 5.14 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,3934 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 0,3935 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada grafik respon percepatan 5.14 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 28,666 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada tabel 5.14 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan dan percepatan pada kendaraan terjadi saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa maupun 1,2 MPa sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, sedangkan nilai maksimum kecepatan pada kendaraan terjadi saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa sebagai tekanan awal gas dari fluida kerja pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan terlihat berhimpit.

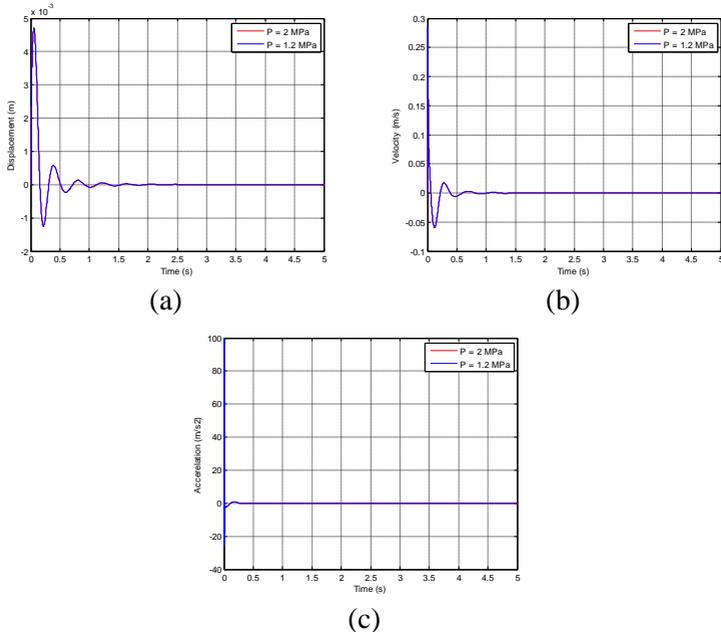
Tabel 5.14 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$), dengan variasi tekanan awal gas

Tekanan Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	<i>Settling time</i> (detik)
P = 2 MPa	0.0163	0.3934	28.666	1,5
P = 1.2 MPa	0.0163	0.3935	28.666	1,5

Dari kedua variasi tekanan awal gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai perpindahan, kecepatan dan percepatan pada kendaraan sangat kecil dan bisa dikatakan berhimpit. Dan apabila dibandingkan antara kedua variasi tekanan gas yang dipakai pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut, maka

sebaiknya menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena energi yang digunakan untuk mengkompresi tekanan 1,2 MPa lebih kecil daripada tekanan 2 MPa

● **Severity Parameter = 20**



Gambar 5.15 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$), dengan variasi tekanan awal gas

Gambar 5.15 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$). Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu

mencapai kondisi *steady state* sebelum 1,5 detik. Pada grafik respon perpindahan 5.15 (a) dan tabel 5.15, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0047 m saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon kecepatan 5.15 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,2839 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon percepatan 5.15 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 99,791 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada tabel 5.15 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan, kecepatan dan percepatan pada kendaraan terjadi saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa maupun 1,2 MPa sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan terlihat berhimpit.

Tabel 5.15 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$), dengan variasi tekanan awal gas

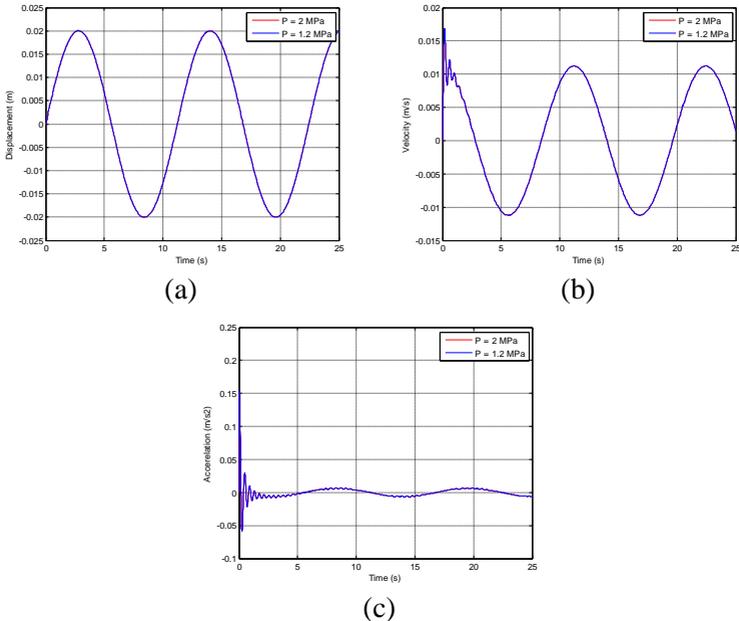
Tekanan Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	<i>Settling time</i> (detik)
P = 2 MPa	0.0047	0.2839	99.791	1,5
P = 1.2 MPa	0.0047	0.2839	99.791	1,5

Dari kedua variasi tekanan awal gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai perpindahan, kecepatan dan percepatan pada kendaraan sangat kecil dan bisa dikatakan berhimpit. Dan apabila dibandingkan antara kedua variasi tekanan gas yang dipakai pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut, maka sebaiknya menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena energi yang digunakan

untuk mengkompresi tekanan 1,2 MPa lebih kecil daripada tekanan 2 MPa

5.2.2.2 Input Sinusoidal

- Kecepatan 20 km/jam



Gambar 5.16 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/h), dengan variasi tekanan awal gas

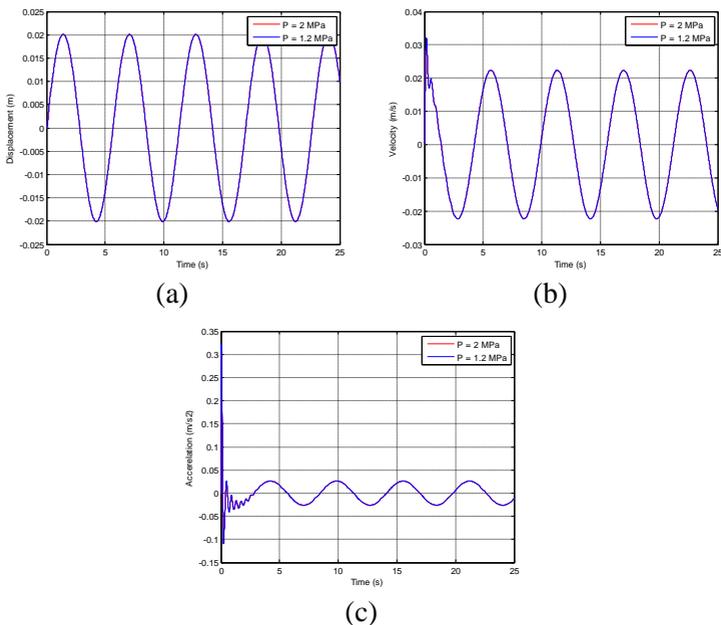
Gambar 5.16 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan kendaraan terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kecepatan mobil saat mencapai 20 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Dari ketiga grafik

tersebut respon yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 3 detik. Pada grafik respon perpindahan, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,02 m saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon kecepatan, nilai maksimum kecepatan sebesar 0,0168 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 0,0169 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada grafik respon percepatan nilai maksimum percepatan sebesar 0,1511 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa, dan 0,1518 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Dilihat dari *trend line*-nya ketiga grafik ini berhimpit pada respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan. Maka sebaiknya menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena energi yang digunakan untuk mengkompresi tekanan 1,2 MPa lebih kecil daripada tekanan 2 MPa.

Tabel 5.16 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/h), dengan variasi tekanan awal gas

Tekanan Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	Percepatan RMS dari getaran (m/s ²)	Settling time (detik)
P = 2 MPa	0.02	0.0168	0.1511	0.0135	3
P = 1.2 MPa	0.02	0.0169	0.1518	0.0136	3

- **Kecepatan 40 km/jam**



Gambar 5.17 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/h), dengan variasi tekanan awal gas

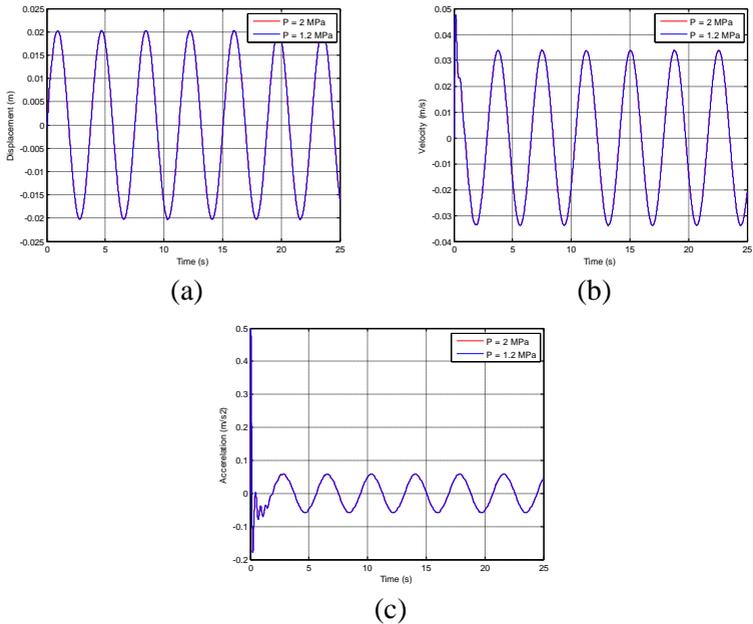
Gambar 5.17 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan kendaraan terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kecepatan mobil saat mencapai 40 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Dari ketiga grafik tersebut respon yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 2,5 detik. Pada grafik respon perpindahan, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0201 m saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon kecepatan, nilai maksimum

kecepatan sebesar 0,032 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 0,0322 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada grafik respon percepatan nilai maksimum percepatan sebesar 0,3203 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa, dan 0,3209 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Dilihat dari *trend line*-nya ketiga grafik ini berhimpit pada respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan. Maka sebaiknya menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena energi yang digunakan untuk mengkompresi tekanan 1,2 MPa lebih kecil daripada tekanan 2 MPa.

Tabel 5.17 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/h), dengan variasi tekanan awal gas

Tekanan Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	Percepatan RMS dari getaran (m/s ²)	Settling time (detik)
P = 2 MPa	0.0201	0.0320	0.3203	0.0393	2,5
P = 1.2 MPa	0.0201	0.0322	0.3209	0.0395	2,5

• **Kecepatan 60 km/jam**



Gambar 5.18 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/h), dengan variasi tekanan awal gas

Gambar 5.18 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan kendaraan terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kecepatan mobil saat mencapai 60 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Dari ketiga grafik tersebut respon yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 2 detik. Pada grafik respon perpindahan, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0203 m saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon kecepatan, nilai maksimum

kecepatan sebesar 0,0474 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 0,0476 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada grafik respon percepatan nilai maksimum percepatan sebesar 0,4989 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa, dan 0,4997 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Dilihat dari *trend line*-nya ketiga grafik ini berhimpit pada respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan. Maka sebaiknya menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena energi yang digunakan untuk mengkompresi tekanan 1,2 MPa lebih kecil daripada tekanan 2 MPa.

Tabel 5.18 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/jam), dengan variasi tekanan awal gas

Tekanan Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	Percepatan RMS dari getaran (m/s ²)	Settling time (detik)
P = 2 MPa	0.0203	0.0474	0.4989	0.0668	2
P = 1.2 MPa	0.0203	0.0476	0.4997	0.0670	2

5.3 Respon Dinamis Penumpang dari Sistem Seperempat Kendaraan Mobil dengan Penggunaan Sistem Suspensi *Hydro-Pneumatic*

Setelah dilakukan simulasi pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, sistem suspensi tersebut diaplikasikan pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan input yang digunakan, yaitu

input *bump modified* dan input sinusoidal. Input *bump modified* digunakan untuk melihat respon *transient* sistem seperempat kendaraan akibat beban *impact*, dan input sinusoidal digunakan untuk melihat respon dinamis sistem seperempat kendaraan akibat beban harmonik. Untuk sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut digunakan spesifikasi pada silinder hidrolis, yaitu massa jenis minyak $\rho = 860 \text{ kg/m}^3$, diameter piston $D = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$, diameter *orifice* $D_o = 1 \times 10^{-2} \text{ m}$, volume awal gas $V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$, dan variasi tekanan awal gas $p_o = 2 \text{ MPa}$ dan $1,2 \text{ MPa}$. Selain itu digunakan dua variasi gas pada silinder hidrolis yaitu nitrogen ($n = 1,1$) dan udara kering ($n = 1,4$) sebagai penghasil gaya pegas.

5.3.1 Variasi Jenis Gas

5.3.1.1 Input *Bump* yang Dimodifikasi

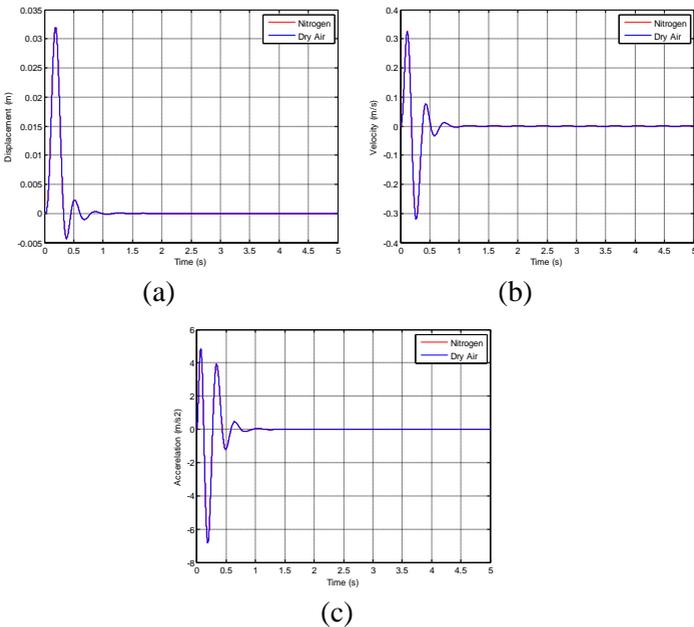
- Severity Parameter = 1

Tabel 5.19 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$), dengan variasi jenis gas

Jenis Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s^2)	<i>Settling time</i> (detik)
Nitrogen	0.0320	0.3252	4.8513	1,5
Udara kering	0.0320	0.3251	4.8411	1,5

Gambar 5.19 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) penumpang pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$). Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama,

yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 1,5 detik. Pada grafik respon perpindahan 5.19 (a) dan tabel 5.19, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,032 m saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon kecepatan 5.19 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,3252 m/s saat menggunakan nitrogen dan 0,3251 m/s saat menggunakan udara kering. Pada grafik respon percepatan 5.19 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 4,8513 m/s² saat menggunakan nitrogen dan 4,8511 m/s² saat menggunakan udara kering.



Gambar 5.19 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$), dengan variasi jenis gas

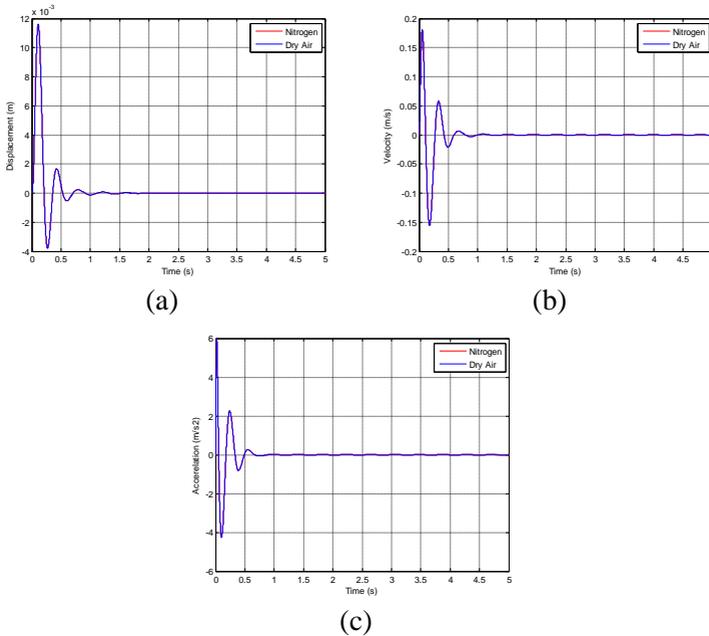
Pada tabel 5.19 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan pada penumpang terjadi saat menggunakan nitrogen maupun udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, sedangkan nilai maksimum kecepatan dan percepatan pada penumpang terjadi saat menggunakan nitrogen sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan terlihat berhimpit.

Dari kedua jenis gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai perpindahan, kecepatan dan percepatan pada penumpang sangat kecil dan bisa dikatakan berhimpit. Dan apabila dibandingkan antara kedua jenis gas yang dipakai pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut, maka sebaiknya menggunakan udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena harganya yang paling murah dibandingkan dengan nitrogen dan ketersediannya yang melimpah di alam.

- **Severity Parameter = 5**

Tabel 5.20 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$), dengan variasi jenis gas

Jenis Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s^2)	<i>Settling time</i> (detik)
Nitrogen	0.0116	0.1811	5.9457	1
Udara kering	0.0116	0.1811	5.9457	1



Gambar 5.20 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$), dengan variasi jenis gas

Gambar 5.20 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$). Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik. Pada grafik respon perpindahan 5.20 (a) dan tabel 5.20, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0116 m saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon kecepatan 5.20 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,1811 m/s saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon

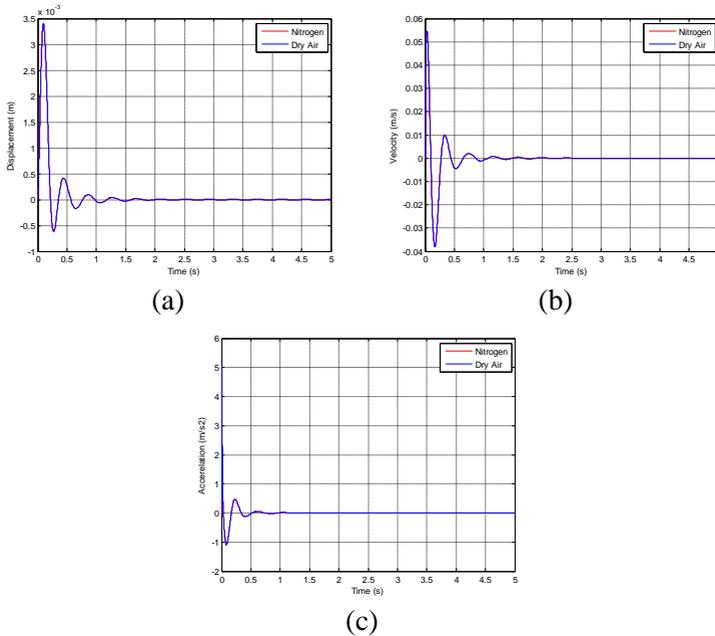
percepatan 5.20 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 5,9457 m/s^2 saat menggunakan nitrogen udara kering. Pada tabel 5.20 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan, kecepatan dan percepatan pada penumpang terjadi saat menggunakan nitrogen maupun udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan terlihat berhimpit.

Dari kedua jenis gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai perpindahan, kecepatan dan percepatan pada penumpang sangat kecil dan bisa dikatakan berhimpit. Dan apabila dibandingkan antara kedua jenis gas yang dipakai pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut, maka sebaiknya menggunakan udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena harganya yang paling murah dibandingkan dengan nitrogen dan ketersediannya yang melimpah di alam.

- **Severity Parameter = 20**

Tabel 5.21 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$), dengan variasi jenis gas

Jenis Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s^2)	<i>Settling time</i> (detik)
Nitrogen	0.0034	0.0546	5.1279	2
Udara kering	0.0034	0.0546	5.1278	2



Gambar 5.21 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$), dengan variasi jenis gas

Gambar 5.21 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) penumpang pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$). Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 2 detik. Pada grafik respon perpindahan 5.21 (a) dan tabel 5.21, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0034 m saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon kecepatan 5.21 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,0546 m/s saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon

percepatan 5.21 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 5,9457 m/s^2 saat menggunakan nitrogen udara kering. Pada tabel 5.21 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan, kecepatan dan percepatan pada penumpang terjadi saat menggunakan nitrogen maupun udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan terlihat berhimpit.

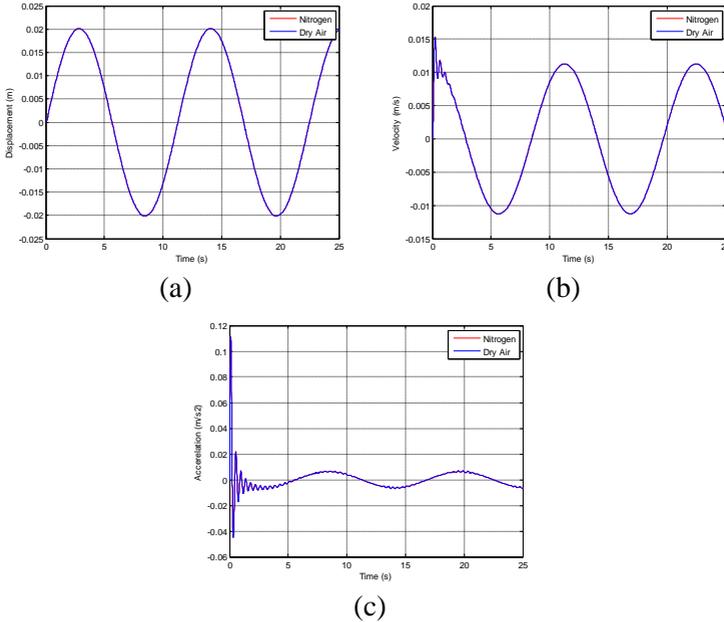
Dari kedua jenis gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai perpindahan, kecepatan dan percepatan pada penumpang sangat kecil dan bisa dikatakan berhimpit. Dan apabila dibandingkan antara kedua jenis gas yang dipakai pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut, maka sebaiknya menggunakan udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena harganya yang paling murah dibandingkan dengan nitrogen dan ketersediannya yang melimpah di alam.

5.3.1.2 Input Sinusoidal

- **Kecepatan 20 km/jam**

Gambar 5.22 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kecepatan mobil saat mencapai 20 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Dari ketiga grafik tersebut respon yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 2,5 detik. Pada grafik respon perpindahan, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0201 m saat menggunakan nitrogen, maupun udara kering. Pada grafik respon kecepatan, nilai maksimum kecepatan sebesar 0,0153 m/s saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon percepatan nilai maksimum percepatan sebesar 0,1114 m/s^2 saat menggunakan nitrogen, dan 0,1109 m/s^2 saat menggunakan udara kering. Dilihat dari *trend line*-nya ketiga

grafik ini berhimpit pada respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan.



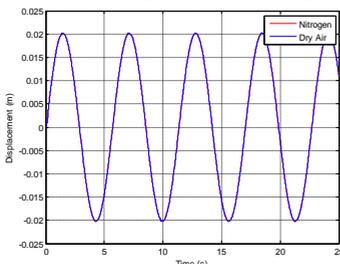
Gambar 5.22 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20 \text{ km/h}$), dengan variasi jenis gas

Tabel 5.22 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20 \text{ km/h}$), dengan variasi jenis gas

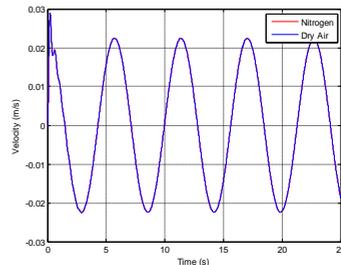
Jenis Gas	Perpindahan	Kecepatan	Percepatan	Percepatan RMS	Settling time
-----------	-------------	-----------	------------	----------------	---------------

	maksimum (m)	maksimum (m/s)	maksimum (m/s ²)	dari getaran (m/s ²)	(detik)
Nitrogen	0.0201	0.0153	0.1114	0.0103	2,5
Udara kering	0.0201	0.0153	0.1109	0.0103	2,5

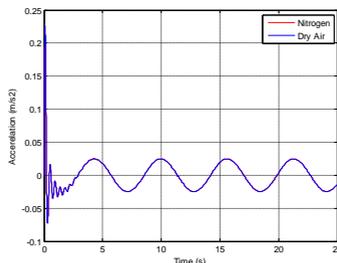
• **Kecepatan 40 km/jam**



(a)



(b)



(c)

Gambar 5.23 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/jam), dengan variasi jenis gas

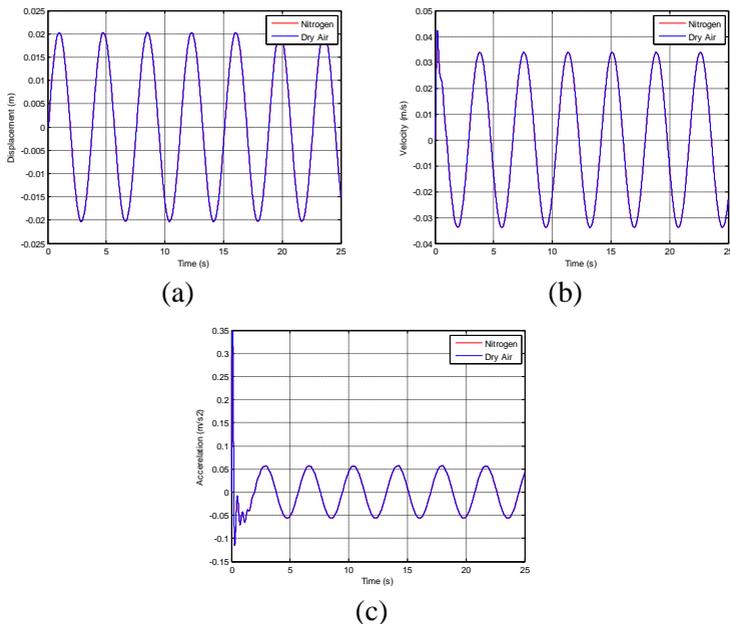
Gambar 5.23 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada

sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kecepatan mobil saat mencapai 40 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Dari ketiga grafik tersebut respon yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 2 detik. Pada grafik respon perpindahan, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0202 m saat menggunakan nitrogen, maupun udara kering. Pada grafik respon kecepatan, nilai maksimum kecepatan sebesar 0,0289 m/s saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon percepatan nilai maksimum percepatan sebesar 0,2268 m/s² saat menggunakan nitrogen, dan 0,2264 m/s² saat menggunakan udara kering. Dilihat dari *trend line*-nya ketiga grafik ini berhimpit pada respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan.

Tabel 5.23 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/jam), dengan variasi jenis gas

Jenis Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	Percepatan RMS dari getaran (m/s ²)	<i>Settling time</i> (detik)
Nitrogen	0.0202	0.0289	0.2268	0.0299	2
Udara kering	0.0202	0.0289	0.2264	0.0298	2

• **Kecepatan 60 km/jam**



Gambar 5.24 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/jam), dengan variasi jenis gas

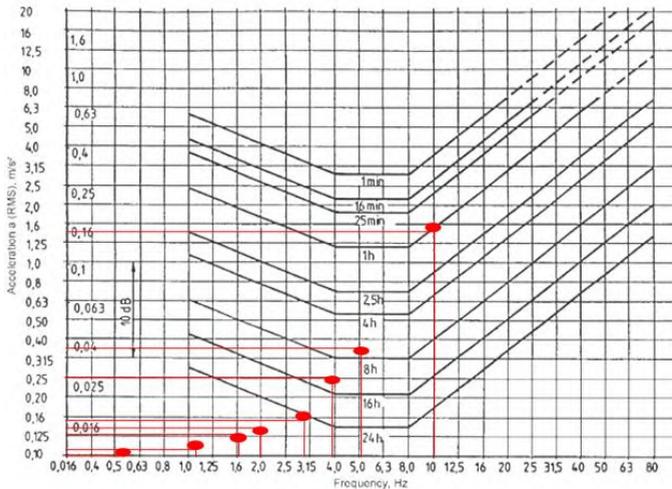
Gambar 5.24 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kecepatan mobil saat mencapai 60 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Dari ketiga grafik tersebut respon yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 2 detik. Pada grafik respon perpindahan, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu

sebesar 0,0203 m saat menggunakan nitrogen, maupun udara kering. Pada grafik respon kecepatan, nilai maksimum kecepatan sebesar 0,0423 m/s saat menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada grafik respon percepatan nilai maksimum percepatan sebesar 0,3493 m/s² saat menggunakan nitrogen, dan 0,3489 m/s² saat menggunakan udara kering. Dilihat dari *trend line*-nya ketiga grafik ini berhimpit pada respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan.

Tabel 5.24 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/jam), dengan variasi jenis gas

Jenis Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	Percepatan RMS dari getaran (m/s ²)	<i>Settling time</i> (detik)
Nitrogen	0.0203	0.0423	0.3493	0.0584	2
Udara kering	0.0203	0.0423	0.3489	0.0584	2

Perbandingan RMS percepatan body penumpang pada input sinusoidal setiap variasi kecepatan kendaraan dengan variasi jenis gas



Gambar 5.25 Grafik respon percepatan RMS penumpang pada sistem seperempat kendaraan mobil terhadap frekuensi dengan input sinusoidal dengan variasi kecepatan 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam

Untuk menganalisa kenyamanan kendaraan akibat eksitasi sinusoidal digunakanlah standar ISO 2631. Gambar 5.25 yang merupakan grafik respon percepatan RMS penumpang pada sistem seperempat kendaraan mobil terhadap frekuensi dengan input sinusoidal dengan variasi kecepatan 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam. Dari kecepatan tersebut, akan diperoleh nilai frekuensi dengan menggunakan rumus $f = \frac{v}{\lambda}$ untuk dijadikan inputan berupa sinusoidal. Setelah itu, nilai percepatan RMS yang telah disimulasikan akan diplot pada grafik ISO 2631.

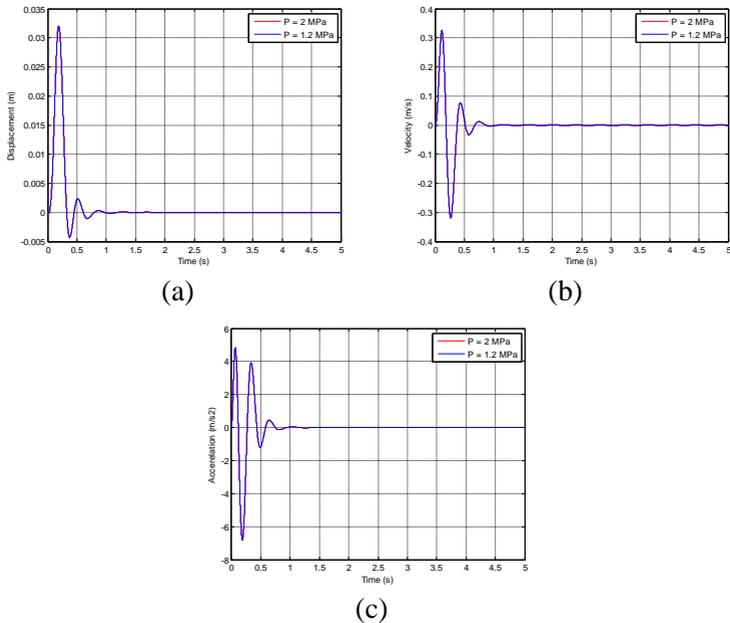
Nilai RMS untuk percepatan getaran penumpang pada saat mobil berkecepatan 20 km/jam adalah sebesar $0,0103 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan nitrogen dan udara kering. Nilai RMS untuk percepatan getaran penumpang pada saat mobil berkecepatan 40 km/jam adalah sebesar $0,0299 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan nitrogen dan $0,0298 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan udara kering. Nilai RMS untuk percepatan getaran penumpang pada saat mobil berkecepatan 60 km/jam adalah sebesar $0,0584 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan nitrogen dan udara kering. Pada gambar 5.25 adalah grafik ketahanan pengendara saat berkendara berdasarkan ISO 2631. Pada grafik ini terlihat dari trendline-nya bahwa pada frekuensi 0,6 Hz – 2 Hz ketahanan pengendara saat berkendara mencapai lebih dari 24 jam. Pada frekuensi 3 Hz ketahanan pengendara saat berkendara mencapai 24 jam. Pada frekuensi 4 Hz ketahanan pengendara saat berkendara mencapai 8-16 jam. Pada frekuensi 5 Hz ketahanan pengendara saat berkendara mencapai 4-8 jam. Pada frekuensi 10 Hz ketahanan pengendara saat berkendara mencapai lebih dari 1 jam. Sedangkan dilihat dari segi kecepatan dapat dilihat pada grafik, pada kecepatan 20 km/jam-60 km/jam ketahanan pengendara dapat bertahan lebih dari 24 jam. Sehingga dapat disimpulkan pada kecepatan tersebut getaran yang terjadi sangatlah kecil.

Dari kedua jenis gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai RMS untuk percepatan getaran penumpang adalah tidak ada keluhan (nyaman) apabila dibandingkan dengan standar ISO 2631. Maka dari itu sebaiknya menggunakan udara kering sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena harganya yang paling murah dibandingkan dengan nitrogen dan ketersediannya yang melimpah di alam.

5.3.2 Variasi Tekanan Awal Gas

5.3.2.1 Input *Bump* yang Dimodifikasi

- Severity Parameter = 1



Gambar 5.26 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$), dengan variasi tekanan awal gas

Gambar 5.26 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$). Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu

mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik. Pada grafik respon perpindahan 5.26 (a) dan tabel 5.25, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,032 m saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon kecepatan 5.26 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,3251 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 0,3252 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada grafik respon percepatan 5.26 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 4.8513 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 4.8517 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada tabel 5.25 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan pada penumpang terjadi saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa maupun 1,2 MPa sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan terlihat berhimpit, sedangkan nilai maksimum kecepatan dan percepatan pada penumpang terjadi saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa sebagai tekanan awal fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*.

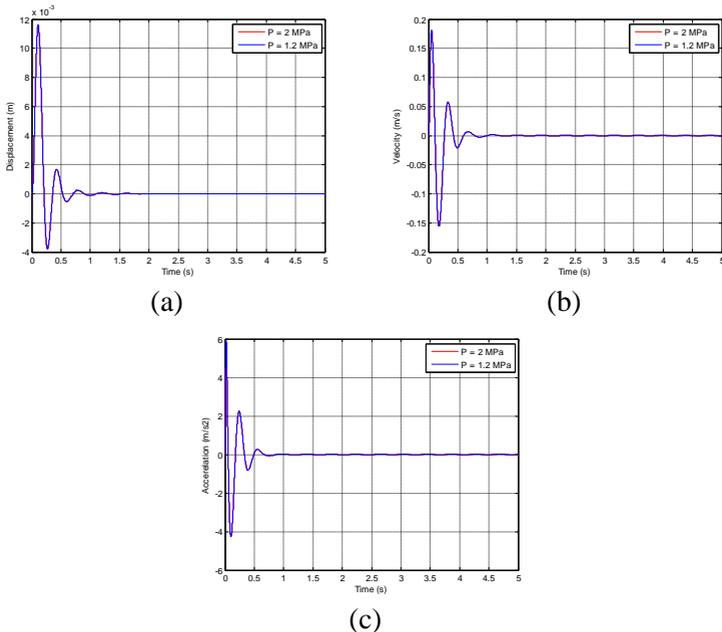
Tabel 5.25 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 1$), dengan variasi tekanan awal gas

Tekanan awal gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	Settling time (detik)
P = 2 MPa	0.0320	0.3251	4.8513	1
P = 1.2 MPa	0.0320	0.3252	4.8517	1

Dari kedua variasi tekanan awal gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai perpindahan, kecepatan dan percepatan pada kendaraan sangat kecil dan bisa dikatakan berhimpit. Dan

apabila dibandingkan antara kedua variasi tekanan gas yang dipakai pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut, maka sebaiknya menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena energi yang digunakan untuk mengkompresi tekanan 1,2 MPa lebih kecil daripada tekanan 2 MPa.

- **Severity Parameter = 5**



Gambar 5.27 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$), dengan variasi jenis gas

Gambar 5.27 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) pada penumpang seperempat kendaraan

mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$). Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik. Pada grafik respon perpindahan 5.27 (a) dan tabel 5.26, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0116 m saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon kecepatan 5.27 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,1181 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon percepatan 5.27 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 5,9461 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 5,9462 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada tabel 5.26 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan pada penumpang terjadi saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa maupun 1,2 MPa sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan terlihat berhimpit, sedangkan nilai maksimum kecepatan dan percepatan pada penumpang terjadi saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa sebagai tekanan awal fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*.

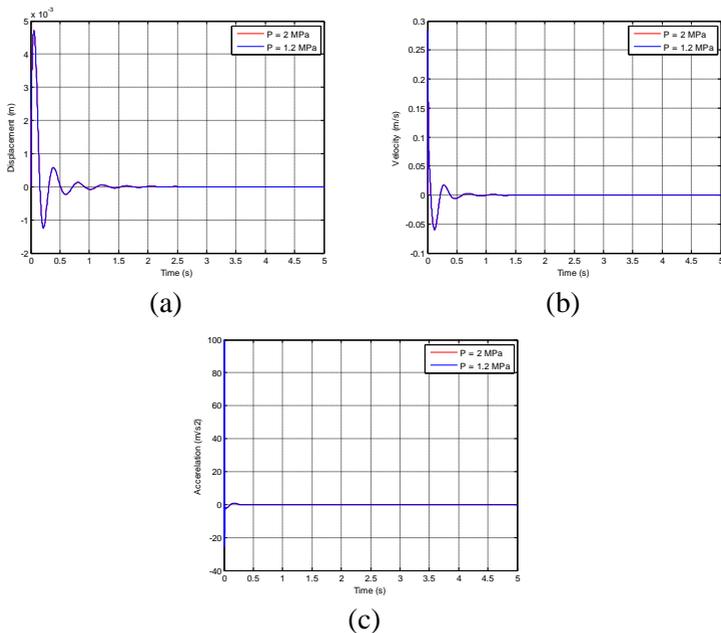
Tabel 5.26 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 5$), dengan variasi jenis gas

Tekanan awal Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	Settling time (detik)
P = 2 MPa	0.0116	0.1811	5.9461	1,5
P = 1.2 MPa	0.0116	0.1811	5.9462	1,5

Dari kedua variasi tekanan awal gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai perpindahan, kecepatan dan percepatan

pada kendaraan sangat kecil dan bisa dikatakan berhimpit. Dan apabila dibandingkan antara kedua variasi tekanan gas yang dipakai pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut, maka sebaiknya menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena energi yang digunakan untuk mengkompresi tekanan 1,2 MPa lebih kecil daripada tekanan 2 MPa

- Severity Parameter = 20



Gambar 5.28 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$), dengan variasi tekanan awal gas

Gambar 5.28 merupakan grafik respon dinamis sistem seperempat kendaraan mobil berupa perpindahan (a), kecepatan (b), dan percepatan (c) pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$). Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 1 detik. Pada grafik respon perpindahan 5.28 (a) dan tabel 5.27, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0034 m saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon kecepatan 5.28 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,0546 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon percepatan 5.28 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 5,1278 m/s^2 saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 5.1279 m/s^2 saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada tabel 5.27 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan dan kecepatan pada penumpang terjadi saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa maupun 1,2 MPa sebagai fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan terlihat berhimpit, sedangkan nilai maksimum percepatan pada penumpang terjadi saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa sebagai tekanan awal fluida gas pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*.

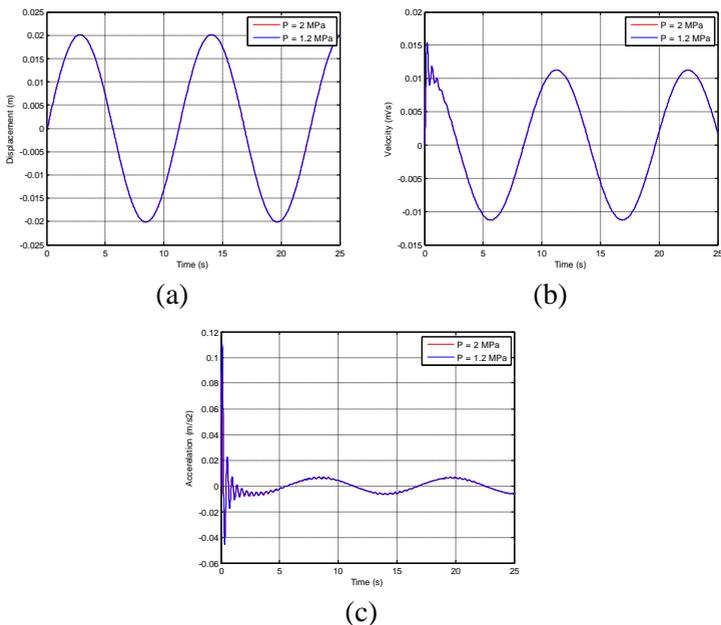
Tabel 5.27 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input *bump modified* ($\gamma = 20$), dengan variasi tekanan awal gas

Tekanan awal gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s^2)	Settling time (detik)
P = 2 MPa	0.0034	0.0546	5.1278	1
P = 1.2 MPa	0.0034	0.0546	5.1279	1

Dari kedua variasi tekanan awal gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai perpindahan, kecepatan dan percepatan pada kendaraan sangat kecil dan bisa dikatakan berhimpit. Dan apabila dibandingkan antara kedua variasi tekanan gas yang dipakai pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut, maka sebaiknya menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena energi yang digunakan untuk mengkompresi tekanan 1,2 MPa lebih kecil daripada tekanan 2 MPa

5.3.2.2 Input Sinusoidal

- Kecepatan 20 km/jam



Gambar 5.29 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat pada kendaraan mobil terhadap waktu dengan input

sinusoidal ($v = 20$ km/jam), dengan variasi jenis gas

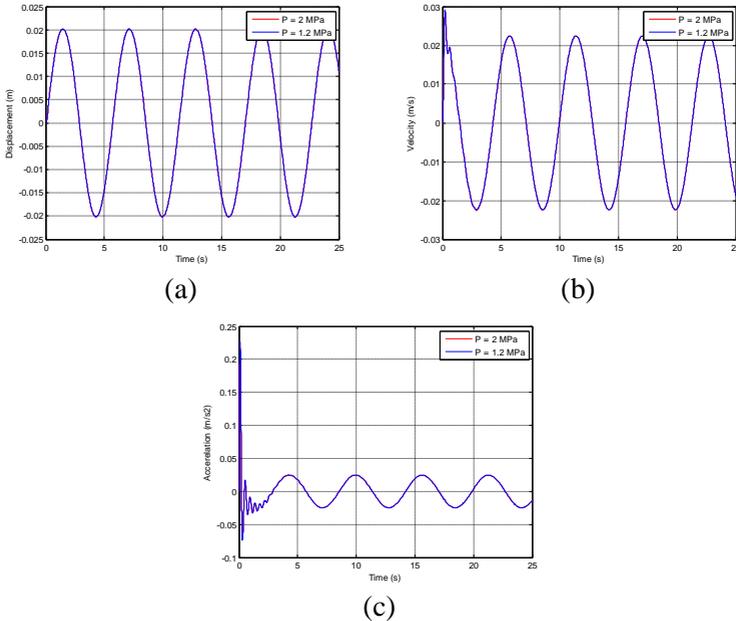
Tabel 5.28 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 20$ km/jam), dengan variasi jenis gas

Tekan an Gas	Perpindah an maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s^2)	Percepatan RMS dari getaran (m/s^2)	Settling time (detik)
P = 2 MPa	0.0201	0.0153	0.1109	0.0106	3
P = 1.2 MPa	0.0201	0.0153	0.1118	0.0106	3

Gambar 5.29 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kecepatan mobil saat mencapai 20 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Dari ketiga grafik tersebut respon yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 3 detik. Pada grafik respon perpindahan, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0201 m saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon kecepatan, nilai maksimum kecepatan sebesar 0,0153 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon percepatan nilai maksimum percepatan sebesar $0,1109 m/s^2$ saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa, dan $0,1118 m/s^2$ saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Dilihat dari

trend line-nya ketiga grafik ini berhimpit pada respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan.

• **Kecepatan 40 km/jam**



Gambar 5.30 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40 \text{ km/jam}$), dengan variasi jenis gas

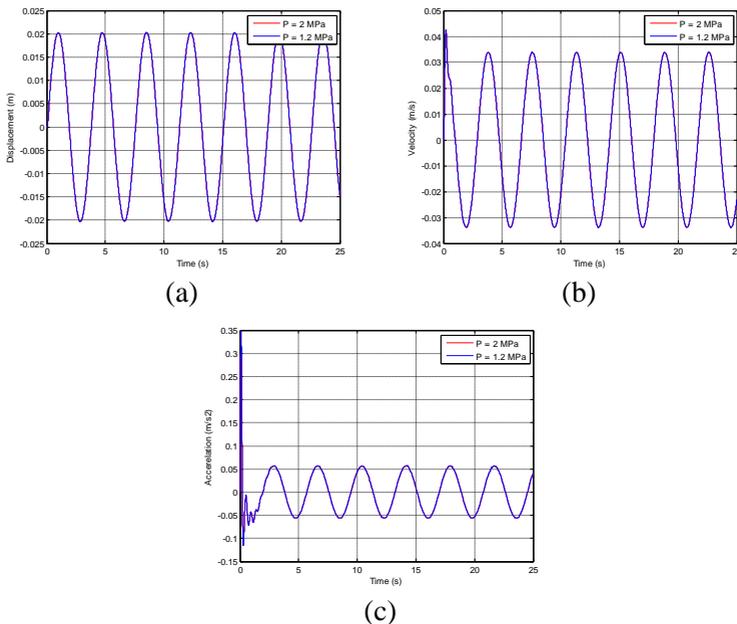
Gambar 5.30 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kecepatan mobil saat mencapai 40 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Dari ketiga grafik

tersebut respon yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 3 detik. Pada grafik respon perpindahan, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0202 m saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon kecepatan, nilai maksimum kecepatan sebesar 0,0289 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 0,0290 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada grafik respon percepatan nilai maksimum percepatan sebesar 0,2264 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa, dan 0,2271 m/s² saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Dilihat dari *trend line*-nya ketiga grafik ini berhimpit pada respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan.

Tabel 5.29 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 40$ km/jam), dengan variasi jenis gas

Tekanan Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	Percepatan RMS dari getaran (m/s ²)	Settling time (detik)
P = 2 MPa	0.0202	0.0289	0.2264	0.0312	3
P = 1.2 MPa	0.0202	0.0290	0.2271	0.0313	3

- **Kecepatan 60 km/jam**



Gambar 5.31 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60$ km/jam), dengan variasi jenis gas

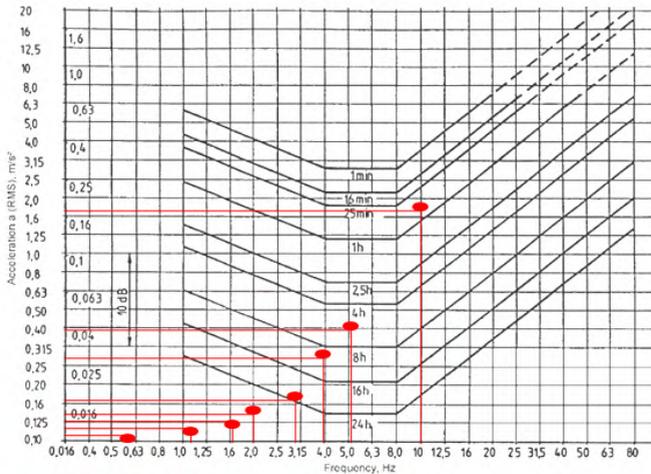
Gambar 5.31 merupakan grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan penumpang terhadap waktu pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada kecepatan mobil saat mencapai 60 km/jam. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state*. Dari ketiga grafik tersebut respon yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 2 detik. Pada grafik respon

perpindahan, nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,0203 m saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa. Pada grafik respon kecepatan, nilai maksimum kecepatan sebesar 0,0423 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 0,0424 m/s saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada grafik respon percepatan nilai maksimum percepatan sebesar 0,3489 m/s^2 saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa, dan 0,3496 m/s^2 saat menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Dilihat dari *trend line*-nya ketiga grafik ini berhimpit pada respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan.

Tabel 5.30 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada penumpang seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal ($v = 60 \text{ km/jam}$), dengan variasi jenis gas

Tekanan Gas	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s^2)	Percepatan RMS dari getaran (m/s^2)	Settling time (detik)
P = 2 MPa	0.0203	0.0423	0.3489	0.0567	2
P = 1.2 MPa	0.0203	0.0424	0.3496	0.0568	2

Perbandingan RMS percepatan body penumpang pada input sinusoidal setiap variasi kecepatan kendaraan dengan variasi tekanan awal gas



Gambar 5.32 Grafik respon percepatan RMS penumpang pada sistem seperempat kendaraan mobil terhadap frekuensi dengan input sinusoidal dengan variasi kecepatan 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam

Untuk menganalisa kenyamanan kendaraan akibat eksitasi sinusoidal digunakanlah standar ISO 2631. Gambar 5.32 yang merupakan grafik respon percepatan RMS penumpang pada sistem seperempat kendaraan mobil terhadap frekuensi dengan input sinusoidal dengan variasi kecepatan 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam. Dari kecepatan tersebut, akan diperoleh nilai frekuensi dengan menggunakan rumus $f = \frac{v}{\lambda}$ untuk dijadikan inputan berupa sinusoidal. Setelah itu, nilai percepatan RMS yang telah disimulasikan akan diplot pada grafik ISO 2631.

Nilai RMS untuk percepatan getaran penumpang pada saat mobil berkecepatan 20 km/jam adalah sebesar $0,0106 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan 1,2 MPa.

Nilai RMS untuk percepatan getaran penumpang pada saat mobil berkecepatan 40 km/jam adalah sebesar $0,0312 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan $0,0313 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Nilai RMS untuk percepatan getaran penumpang pada saat mobil berkecepatan 60 km/jam adalah sebesar $0,0567 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan $0,0568 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa. Pada gambar 5.32 adalah grafik ketahanan pengendara saat berkendara berdasarkan ISO 2631. Pada grafik ini terlihat dari trendline-nya bahwa pada frekuensi 0,6 Hz – 2 Hz ketahanan pengendara saat berkendara mencapai lebih dari 24 jam. Pada frekuensi 3 Hz ketahanan pengendara saat berkendara mencapai 24 jam. Pada frekuensi 4 Hz ketahanan pengendara saat berkendara mencapai 8-16 jam. Pada frekuensi 5 Hz ketahanan pengendara saat berkendara mencapai 4-8 jam. Pada frekuensi 10 Hz ketahanan pengendara saat berkendara mencapai lebih dari 25 menit - 1 jam. Sedangkan dilihat dari segi kecepatan dapat dilihat pada grafik, pada kecepatan 20 km/jam-60 km/jam ketahanan pengendara dapat bertahan lebih dari 24 jam. Sehingga dapat disimpulkan pada kecepatan tersebut getaran yang terjadi sangatlah kecil.

Dari kedua jenis gas yang digunakan pada simulasi, hasil dari nilai RMS untuk percepatan getaran penumpang adalah tidak ada keluhan (nyaman) apabila dibandingkan dengan standar ISO 2631. Maka sebaiknya menggunakan tekanan awal gas sebesar 1,2 MPa pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* karena energi yang digunakan untuk mengkompresi tekanan 1,2 MPa lebih kecil daripada tekanan 2 MPa.

5.4 Respon Dinamis Gaya Tekan dari Ban (*Road Holding*) akibat penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic*

Setelah dilakukan simulasi pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, sistem suspensi tersebut diaplikasikan pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan input yang digunakan, yaitu

input *bump modified* dan input sinusoidal. Kemudian dari sistem seperempat kendaraan tersebut ditampilkan nilai gaya tekan dari ban yang disebabkan adanya sistem suspensi tersebut. Untuk sistem suspensi *hydro-pneumatic* tersebut digunakan spesifikasi pada silinder hidrolis, yaitu massa jenis minyak $\rho = 860 \text{ kg/m}^3$, diameter piston $D = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$, diameter *orifice* $D_o = 1 \times 10^{-2} \text{ m}$, volume awal gas $V_o = 0,00008854 \text{ m}^3$, tekanan awal gas $p_o = 2 \text{ MPa}$, dan variasi tekanan pada ban yaitu 30 Psi dan 35 Psi. Selain itu digunakan dua variasi gas pada silinder hidrolik yaitu nitrogen ($n = 1,1$) dan udara kering ($n = 1,4$) sebagai penghasil gaya pegas, dengan pertimbangan nilai ekonomisnya dan kualitasnya.

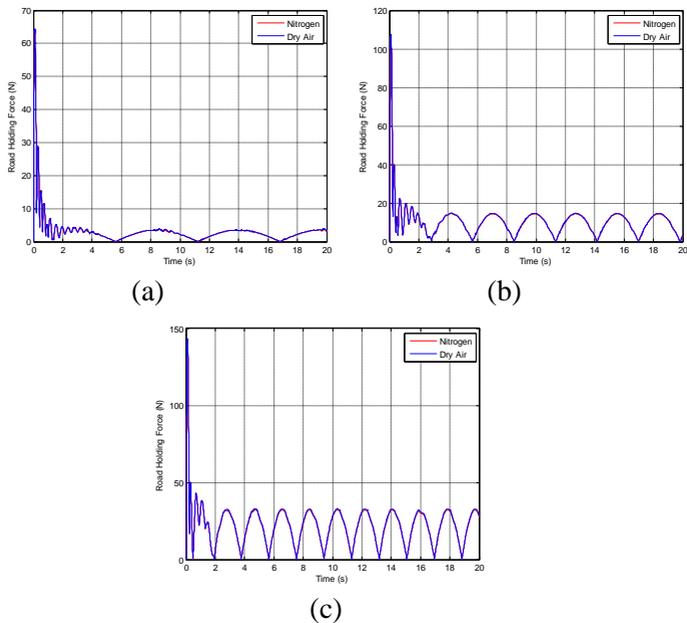
5.4.1 Variasi Jenis Gas

Tabel 5.31 Nilai gaya tekan ban maksimum dengan variasi nilai kecepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal dan variasi jenis gas

	Nitrogen			Udara Kering		
	v = 20 km/h	v = 40 km/h	v = 60 km/h	v = 20 km/h	v = 40 km/h	v = 60 km/h
Gaya Tekan Ban	63.71	107.05	142.5 3	64.34	107.63	143.41
RMS Gaya Tekan Ban	7.13	17.48	30.16	7.19	17.67	32.62
<i>Settling time</i> (detik)	5	3	2	5	3	2

Gambar 5.33 merupakan grafik respon dinamis gaya tekan ban pada berbagai kecepatan ban (a) kecepatan 20 km/jam, (b) kecepatan 40 km/jam, dan (c) kecepatan 60 km/jam terhadap waktu pada kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* dengan input sinusoidal. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state* dan didapatkan respon yang berbeda, yaitu mencapai

kondisi *steady state* sebelum 5 detik untuk kecepatan 20 km/jam, 3 detik untuk kecepatan 40 km/jam dan 2 detik untuk kecepatan 60 km/jam. Pada grafik respon gaya tekan pada saat kecepatan 20 km/jam, nilai maksimumnya sebesar 63,71 N saat menggunakan nitrogen dan 64,34 N saat menggunakan udara kering. Pada grafik respon gaya tekan pada saat kecepatan 40 km/jam, nilai maksimumnya sebesar 107,05 N saat menggunakan nitrogen dan 107,63 N saat menggunakan udara kering. Pada grafik respon gaya tekan pada saat kecepatan 60 km/jam, nilai maksimumnya sebesar 142,5 N saat menggunakan nitrogen dan 143,4 N saat menggunakan udara kering.



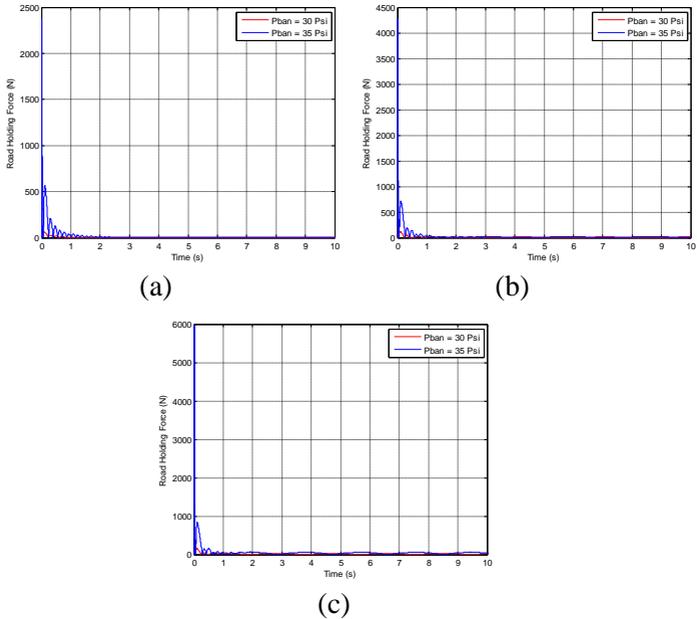
Gambar 5.33 Grafik respon dinamis gaya tekan ban (road holding) (a) kecepatan 20 km//jam, (b) kecepatan 40 km//jam, (c) kecepatan 60 km//jam pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal dan variasi jenis gas

Pada grafik tersebut terlihat perbedaan antara grafik 5.33 (a), (b), dan (c). Pada grafik (a) terlihat bahwa nilai gaya cengkram atau gaya tekan bannya pada saat menggunakan kecepatan kendaraan 20 km/jam lebih kecil daripada kecepatan lainnya, kemudian nilai gaya tekan bannya semakin besar pada saat penambahan kecepatan. Hal tersebut berarti bahwa semakin besar kecepatannya, semakin besar gaya tekan ban untuk mencengkram jalan. Untuk *trend line* grafik ini terlihat berhimpit antara saat menggunakan gas nitrogen dan udara kering. Pada grafik 5.33 terlihat nilai gaya tekan ban bernilai positif, hal tersebut menunjukkan bahwa ban berada dalam posisi aman yaitu masih menapaki jalan. Untuk variasi dengan menggunakan gas nitrogen dan udara kering, tidak terlihat perbedaannya. Untuk itu sebaiknya menggunakan udara kering sebagai pengisi fluida gas pada ban karena harganya yang paling murah dibandingkan dengan nitrogen dan ketersediannya yang melimpah di alam.

5.4.2 Variasi Tekanan Ban

Tabel 5.32 Nilai gaya tekan ban maksimum dengan variasi nilai kecepatan maksimum pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal dan variasi tekanan gas pada ban

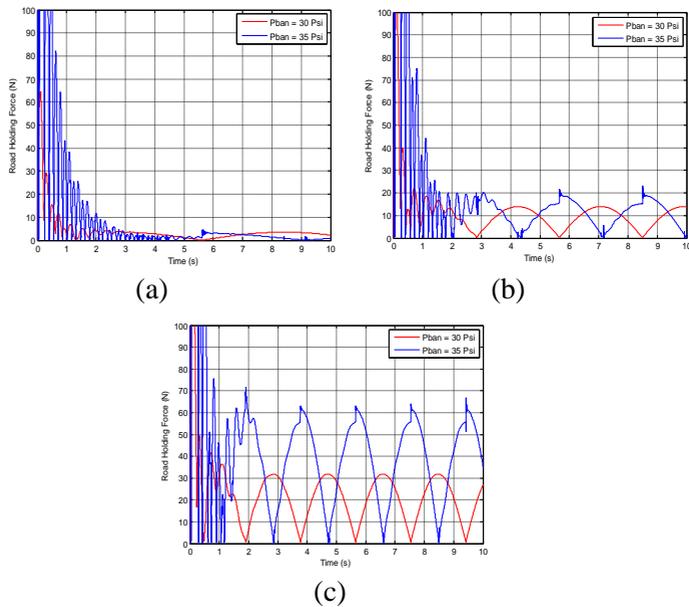
	Nitrogen			Udara Kering		
	v = 20 km/h	v = 40 km/h	v = 60 km/h	v = 20 km/h	v = 40 km/h	v = 60 km/h
Gaya Tekan Ban	64.5	107.9	143.5	2370.5	4269.3	5965
RMS Gaya Tekan Ban	8.19	16.12	28.21	100.6	152.2	200.3
<i>Settling time</i> (detik)	6	3	2	9	4	3



Gambar 5.34 Grafik respon dinamis gaya tekan ban (*road holding*) (a) kecepatan 20 km/jam, (b) kecepatan 40 km/jam, (c) kecepatan 60 km/jam pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal dan variasi tekanan gas pada ban

Gambar 5.34 merupakan grafik respon dinamis gaya tekan ban pada berbagai kecepatan ban (a) kecepatan 20 km/jam, (b) kecepatan 40 km/jam, dan (c) kecepatan 60 km/jam terhadap waktu pada kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* dengan input sinusoidal, sedangkan gambar 5.35 merupakan grafik perbesaran dari gambar 5.34. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon dari grafik merupakan respon *steady state* dan didapatkan respon yang berbeda, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 5,5 detik untuk kecepatan 20 km/jam, 3,5 detik untuk kecepatan 40 km/jam dan 2,5 detik

untuk kecepatan 60 km/jam. Pada grafik respon gaya tekan pada saat kecepatan 20 km/jam, nilai maksimumnya sebesar 64,5 N saat menggunakan tekanan ban 30 Psi dan 2370,5 N saat menggunakan tekanan ban 35 Psi. Pada grafik respon gaya tekan pada saat kecepatan 40 km/jam, nilai maksimumnya sebesar 107,8 N saat menggunakan tekanan ban 30 Psi dan 4269,3 N saat menggunakan tekanan ban 35 Psi. Pada grafik respon gaya tekan pada saat kecepatan 60 km/jam, nilai maksimumnya sebesar 143,5 N saat menggunakan tekanan ban 30 Psi dan 5965 N saat menggunakan tekanan ban 35 Psi. Pada *trend line* grafik ini terlihat lebih besar saat menggunakan tekanan 35 Psi.



Gambar 5.35 Grafik perbesaran respon dinamis gaya tekan ban (*road holding*) (a) kecepatan 20 km/jam, (b) kecepatan 40 km/jam, (c) kecepatan 60 km/jam pada seperempat kendaraan mobil terhadap waktu dengan input sinusoidal dan variasi tekanan gas pada ban

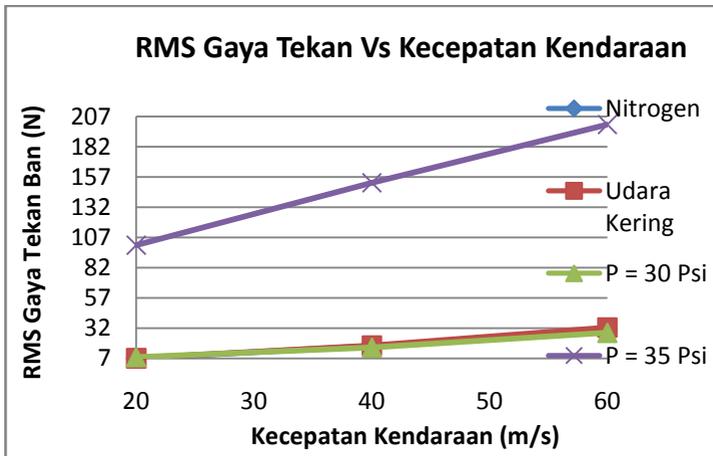
Pada grafik tersebut terlihat perbedaan antara grafik 5.35 (a), (b), dan (c). Pada grafik (a) terlihat bahwa nilai gaya cengkeram atau gaya tekan bannya pada saat menggunakan kecepatan kendaraan 20 km/jam lebih kecil daripada kecepatan lainnya, kemudian nilai gaya tekan bannya semakin besar pada saat penambahan kecepatan. Hal tersebut berarti bahwa semakin besar kecepatannya, semakin besar gaya tekan ban untuk mencengkeram jalan.

Pada grafik 5.35 terlihat nilai gaya tekan ban bernilai positif, hal tersebut menunjukkan bahwa ban berada dalam posisi aman yaitu masih menapaki jalan. Untuk variasi dengan menggunakan tekanan 30 Psi dan 35 Psi, karena perbedaan nilai tekanan ban mengakibatkan koefisien redaman ban menjadi lebih besar dan konstanta pegas menjadi lebih kecil, sehingga hal tersebut menjadikan nilai gaya tekan ban menjadi lebih besar dan terlihat perbedaannya dengan jelas. Maka dari itu sebaiknya menggunakan tekanan 35 Psi pada ban karena lebih aman dan nyaman saat menapaki jalan.

Perbandingan RMS gaya tekan ban (*road holding*) pada ban dengan input sinusoidal setiap variasi kecepatan kendaraan dengan variasi jenis gas dan variasi tekanan ban

Gambar 5.36 merupakan grafik perbandingan respon RMS gaya tekan ban (*road holding*) pada ban dengan input sinusoidal setiap variasi kecepatan kendaraan untuk variasi jenis gas dan variasi tekanan ban. Untuk variasi jenis gas nilai RMS untuk gaya tekan ban (*road holding*) pada saat mobil berkecepatan 20 km/jam adalah sebesar 7,13 N ketika menggunakan nitrogen dan 7,19 N ketika menggunakan udara kering. Nilai RMS untuk gaya tekan ban (*road holding*) pada saat mobil berkecepatan 40 km/jam adalah sebesar 17,48 N ketika menggunakan nitrogen dan 17,67 N ketika menggunakan udara kering. Nilai RMS untuk gaya tekan ban (*road holding*) pada saat mobil berkecepatan 60 km/jam adalah sebesar 30,16 N ketika menggunakan nitrogen dan

32,62 N ketika menggunakan udara kering. Pada grafik tersebut untuk variasi jenis gas terlihat berhimpit, hal ini dikarenakan karena perbedaan koefisien adiabatik antara jenis gas nitrogen dan udara kering perbedaannya sangat kecil sehingga terlihat berhimpit.



Gambar 5.36 Grafik perbandingan respon RMS gaya tekan ban (*road holding*) pada ban dengan input sinusoidal setiap variasi kecepatan kendaraan untuk variasi jenis gas dan variasi tekanan ban

Untuk variasi tekanan ban nilai RMS untuk gaya tekan ban (*road holding*) pada saat mobil berkecepatan 20 km/jam adalah sebesar 8,19 N ketika ban bertekanan 30 Psi dan 100,6 N ketika ban bertekanan 35 Psi. Nilai RMS untuk gaya tekan ban (*road holding*) pada saat mobil berkecepatan 40 km/jam adalah sebesar 16,12 N ketika ban bertekanan 30 Psi dan 152,2 N ketika ban bertekanan 35 Psi. Nilai RMS untuk gaya tekan ban (*road holding*) pada saat mobil berkecepatan 60 km/jam adalah sebesar 28,21 N ketika ban bertekanan 30 Psi dan 200,3 N ketika ban bertekanan 35 Psi. Pada grafik tersebut untuk variasi tekanan ban

terlihat perbedaannya sangat jauh, hal ini dikarenakan karena perbedaan nilai tekanan ban mengakibatkan koefisien redaman ban menjadi lebih besar dan konstanta pegas menjadi lebih kecil sehingga perbedaannya terlihat jelas.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa pada sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic*, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Semakin kecil diameter *orifice* (D_o) pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, maka gaya redam yang dihasilkan semakin besar. Hal ini sesuai dengan persamaan gaya redam yang digunakan pada silinder hidrolis, yaitu kuadrat luas penampang *orifice* (A_o^2) berbanding terbalik dengan gaya redam yang dihasilkan (F_d).
2. Semakin besar tekanan awal gas (p_0) pada sistem suspensi *hydro-pneumatic*, maka gaya pegas yang dihasilkan semakin besar. Hal ini sesuai dengan persamaan gaya pegas yang digunakan pada silinder hidrolis, yaitu tekanan awal gas (p_0) berbanding lurus dengan gaya pegas yang dihasilkan (F_k).
3. Semakin besar volume awal gas (V_o), maka gaya pegas yang dihasilkan semakin kecil. Hal ini sesuai dengan persamaan gaya pegas yang digunakan pada silinder hidrolis, yaitu semakin besar volume awal gas (V_o), gaya pegas yang dihasilkan akan semakin kecil.
4. Pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic* untuk input *bump modified* dengan variasi jenis gas, respon kendaraan dan penumpang mencapai kondisi *steady state* kurang dari 2 detik. Nilai *overshoot* maksimum sebesar 0,0395 m dan 0,032 m pada respon perpindahan kendaraan dan penumpang saat $\gamma= 1$; pada respon kecepatan kendaraan dan penumpang, nilai *overshoot* maksimum sebesar 0,4637

m/s dan 0,3252 m/s saat $\gamma = 1$; pada respon percepatan kendaraan dan penumpang, nilai *overshoot* maksimum sebesar 99,7914 m/s² dan 5,9457 m/s² saat $\gamma = 20$ dan $\gamma = 5$. Sedangkan untuk variasi tekanan awal gas, respon kendaraan dan penumpang mencapai kondisi *steady state* kurang dari 1,5 detik dengan nilai *overshoot* maksimum sebesar 0,0395 m dan 0,032 m pada respon perpindahan kendaraan dan penumpang saat $\gamma = 1$; pada respon kecepatan kendaraan dan penumpang, nilai *overshoot* maksimum sebesar 0,4636 m/s dan 0,3252 m/s saat $\gamma = 1$; pada respon percepatan kendaraan dan penumpang, nilai *overshoot* maksimum sebesar 99,791 m/s² dan 5,9461 m/s² saat $\gamma = 20$ dan $\gamma = 5$.

5. Pada sistem seperempat kendaraan mobil dengan penggunaan sistem suspensi *hydro-pneumatic* untuk input sinusoidal dengan variasi jenis gas, respon kendaraan dan penumpang mencapai kondisi *steady state* kurang dari 3 detik. Nilai *overshoot* maksimum sebesar 0,0203 pada respon perpindahan kendaraan dan penumpang; pada respon kecepatan kendaraan dan penumpang, nilai *overshoot* maksimum sebesar 0,0475 m/s dan 0,0424 m/s; pada respon percepatan kendaraan dan penumpang, nilai *overshoot* maksimum sebesar 0,4993 m/s² dan 0,3496 m/s² saat $v = 60$ km/jam. Sedangkan dengan variasi tekanan awal gas, respon kendaraan dan penumpang mencapai kondisi *steady state* kurang dari 3 detik dengan *overshoot* maksimum sebesar 0,0203 pada respon perpindahan kendaraan dan penumpang; pada respon kecepatan kendaraan dan penumpang, nilai *overshoot* maksimum sebesar 0,0476 m/s dan 0,0424 m/s; pada respon percepatan kendaraan dan penumpang, nilai *overshoot* maksimum sebesar 0,4997 m/s² dan 0,3496 m/s² saat $v = 60$ km/jam.
6. Nilai RMS percepatan getaran penumpang dengan variasi jenis gas pada $v = 20$ km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam adalah sebesar 0,0103 m/s² ketika menggunakan nitrogen

dan udara kering; $0,0299 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan nitrogen dan udara kering; $0,0584 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan nitrogen dan udara kering. Sedangkan untuk variasi tekanan awal gas pada $v = 20 \text{ km/jam}$, 40 km/jam , dan 60 km/jam adalah sebesar $0,0106 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan $1,2 \text{ MPa}$; dan $0,0312 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan $1,2 \text{ MPa}$; $0,0567 \text{ m/s}^2$ ketika menggunakan tekanan awal gas sebesar 2 MPa dan $1,2 \text{ MPa}$. Pada $v = 20 \text{ km/jam}$ - 60 km/jam ketahanan pengendara dapat bertahan lebih dari 24 jam, sehingga dapat disimpulkan pada kecepatan tersebut getaran yang timbul sangatlah kecil. Dan apabila dibandingkan dengan standar ISO 2631, hasil nilai RMS untuk percepatan getaran penumpang adalah tidak ada keluhan (nyaman)

7. Nilai RMS gaya tekan ban, variasi jenis gas saat mobil berkecepatan 20 km/jam adalah sebesar $7,13 \text{ N}$ ketika menggunakan nitrogen dan $7,19 \text{ N}$ ketika menggunakan udara kering; saat mobil berkecepatan 40 km/jam adalah sebesar $17,48 \text{ N}$ ketika menggunakan nitrogen dan $17,67 \text{ N}$ ketika menggunakan udara kering; saat mobil berkecepatan 60 km/jam adalah sebesar $30,16 \text{ N}$ ketika menggunakan nitrogen dan $32,62 \text{ N}$ ketika menggunakan udara kering. Sedangkan nilai RMS gaya tekan ban, variasi tekanan ban saat mobil berkecepatan 20 km/jam adalah sebesar $8,19 \text{ N}$ ketika ban bertekanan 30 Psi dan $100,6 \text{ N}$ ketika ban bertekanan 35 Psi ; saat mobil berkecepatan 40 km/jam adalah sebesar $16,12 \text{ N}$ ketika ban bertekanan 30 Psi dan $152,2 \text{ N}$ ketika ban bertekanan 35 Psi ; saat mobil berkecepatan 60 km/jam adalah sebesar $28,21 \text{ N}$ ketika ban bertekanan 30 Psi dan $200,3 \text{ N}$ ketika ban bertekanan 35 Psi . Dari kedua variasi nilai RMS gaya tekan ban bernilai positif, sehingga ban berada dalam posisi aman yaitu masih menapaki jalan.

1.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran untuk pengembangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk mencoba menguji eksperimen sistem suspensi *hydro-pneumatic* dan sistem seperempat kendaraan mobil dengan penambahan sistem suspensi *hydro-pneumatic* pada setiap jenis variasi untuk memvalidasi simulasi dari hasil matematis pemodelan.
2. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk melakukan perkembangan sistem suspensi *hydro-pneumatic* menjadi sistem suspensi aktif agar aliran fluida di dalam silinder hidrolis dapat diatur sehingga lebih efektif dalam mengurangi getaran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fox dan McDonald's. 2011. **Introduction to Fluid Mechanics Eighth Edition**. Amerika: John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Ikhsan, Muhammad. 2008. **Perancangan Suspensi Depan**. Jakarta : FT UI
- [3] ISO: Guide for The Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. 1997. International Standart 2631. **International Organization for Standardization**.
- [4] Rao, Singiresu S. 2011. **Mechanical Vibrations Fifth Edition**. Miami: Pearson Education, Inc.
- [5] Santosa, Dikki Tesna, Sumardi, dan Triwiyatno, Aris. 2012. **Perancangan Sistem Suspensi Aktif Nonlinear Tipe Paralel dengan Kendali Hybrid Fuzzy PID pada Model Seperempat Kendaraan**. Semarang:Universitas Dipenogoro.
- [6] Setiawan, Listy F. 2014. **Modeling and Analysis of The Influence of Asymmetrical Damper on The Ride Comfort of The Vehicle**. Surabaya: Teknik Mesin ITS.
- [7] Wikipedia. 2015. **Vibration**.<URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Vibration>>
- [8] Wikipedia. 2015. **“Peredam Kejut”**.<URL: https://id.wikipedia.org/wiki/Peredam_kejut>
- [9] Zessar, Faldy dan Wasiwitono, Unggul. 2012. **“Desain dan Analisa Sistem Suspensi Kendaraan Multiguna Pedesaan”**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- [10] Hestingrum, Yunita dan Laksana Guntur, Harus. 2015. **Pemodelan dan Analisis Pengaruh Perubahan Parameter Sistem Suspensi Oleo-Pneumatic terhadap Gaya Redam dan Gaya Pegas serta Respon Dinamis Penumpang Pesawat Boeing 747-400 Proses Landing dan Takeoff**. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

- [11] Sutantra, Nyoman I. 2001. **Teknologi Otomotif Teori dan Aplikasinya**. Surabaya : Penerbit Guna Widya.
- [12] Wikipedia. 2016. "**Mobil**". <<https://id.wikipedia.org/wiki/Mobil>>
- [13] Poonamohan, Pinjarla, Kishore Lakshmana. 2012. **Design and Analysis of a Shock Absorber**. India : GIET.
- [14] Alvarez-Sanchez, Ervin. 2013. **A quarter-car suspension system: car body mass estimator and sliding mode control**. Mexico : Universidad Veracruzana.
- [15] Blundell, Michael and Harty, Damian. 2015. **Types of suspension and drive**. - : Elsevier Ltd.
- [16] Wikipedia. 2016. "**Hydropneumatic suspension**". <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydropneumatic_suspension>

BIODATA PENULIS



Istina Rahmawati dilahirkan di Sukoharjo, 10 Januari 1994 anak yang terlahir dari orangtua terbaik bernama Alm. Biyanto dan Surati. Riwayat pendidikan penulis diawali di TK Wonoharjo I, Kecamatan Wonogiri, Kabupaten Wonogiri pada tahun 1999-2000. Penulis melanjutkan pendidikannya di SDN I Wonoharjo pada tahun 2000-2006, kemudian melanjutkan di SMPN 5 Wonogiri, Kabupaten Wonogiri pada 2006-2009, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAN 1 Sukoharjo Kabupaten Sukoharjo pada tahun 2009-2012. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur SNMPTN Undangan.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Penulis juga pernah menjadi asisten Laboratorium Desain. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi Kabiro Administrasi Divisi Kewirausahaan di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) pada tahun 2013-2014. Kemudian pada tahun 2014-2016, penulis aktif menjadi Staff Divisi Kewirausahaan di LBMM.

Motto hidup penulis yaitu “*Be the best*” menjadikan penulis selalu bersemangat dan berusaha keras untuk mencapai suatu yang diinginkan penulis. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email ist.ariantp@gmail.com.