



TUGAS AKHIR - TM 141585

**PENGEMBANGAN DAN ANALISIS KARAKTERISTIK *HYDRO-MAGNETO-ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK ABSORBER* (HMERSA) DENGAN *HYDROELECTRIC POWER GENERATOR***

DIDI BAHARI  
NRP 2113100103

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

PROGRAM SARJANA  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2018



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM141585

**PENGEMBANGAN DAN ANALISIS KARAKTERISTIK  
*HYDRO-MAGNETO-ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK  
ABSORBER (HMERSA) DENGAN HYDROELECTRIC  
POWER GENERATOR***

DIDI BAHARI  
NRP. 2113100103

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

PROGRAM SARJANA  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2018





FINAL PROJECT - TM141585

**DEVELOPMENT AND CHARACTERISTIC ANALYSIS OF  
HYDRO-MAGNETO-ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK  
ABSORBER (HMERSA) USING HYDROELECTRIC POWER  
GENERATOR**

DIDI BAHARI  
NRP. 2113100103

Final Project Advisor:  
Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M. Eng.

BACHELOR PROGRAM  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA 2018

**PENGEMBANGAN DAN ANALISIS  
KARAKTERISTIK *HYDRO-MAGNETO-ELECTRIC  
REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HMERSA)*  
DENGAN *HYDROELECTRIC POWER GENERATOR***

**TUGAS AKHIR**

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

Oleh:

**DIDI BAHARI**

NRP. 02111340000103

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Eng. Harus Laksana G., S.T., M.Eng. (Pembimbing)  
NIP. 197505111999031001
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T. (Penguji I)  
NIP. 197004121997032003
3. Moch. Solichin, S.T., M.T. (Penguji II)  
NIP. 198908172015041003
4. Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T. (Penguji III)  
NIP. 198907052015042005



**SURABAYA**

**JANUARI, 2018**

**PENGEMBANGAN DAN ANALISIS  
KARAKTERISTIK *HYDRO-MAGNETO-ELECTRIC  
REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HMERSA)*  
DENGAN *HYDROELECTRIC POWER GENERATOR***

**Nama** : Didi Bahari  
**NRP** : 2113100103  
**Jurusan** : Teknik Mesin ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T.,  
**M. Eng.**

**ABSTRAK**

*Berdasarkan buku karangan Bolton yang berjudul classical physics of matter, dalam sebuah kendaraan yang menggunakan sumber bahan bakar fosil, nilai efisiensi keseluruhan sistem berkisar 30%. Salah satu penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensi kendaraan adalah dengan mengembangkan hydro-magneto-electric regenerative shock absorber (HMERSA). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan prototype HMERSA untuk kendaraan angkut, mengetahui karakteristik gaya redam pada sistem suspensi konvensional dan HMERSA saat melewati bump, serta energi listrik bangkitan pada sistem HMERSA saat melewati bump.*

*Sistem HMERSA yang dikembangkan pada tugas akhir ini akan diimplementasikan pada seperempat kendaraan, dan menggunakan pipa-pipa hidrolik yang menyambungkan shock absorber dengan hydroelectric power generator. Sistem ini dikembangkan untuk mengurangi losses yang terjadi akibat gesekan roda gigi seperti pada penelitian-penelitian terdahulu. Pada tugas akhir ini juga akan dilakukan simulasi shock absorber konvensional dan sistem HMERSA seperempat kendaraan dengan menggunakan software MATLAB Simulink untuk mengetahui karakteristik gaya redam pada shock absorber konvensional dan*

sistem HMERSA, dan juga energi bangkitan yang dihasilkan. Kendaraan yang digunakan untuk pengujian adalah kendaraan angkut jenis Daihatsu Gran Max. Pengujian pada kendaraan angkut dilakukan dengan variasi kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam

Hasil yang didapatkan pada tugas akhir ini yaitu karakteristik gaya redam untuk shock absorber konvensional dari hasil simulasi sebesar 115.8 N pada kecepatan 10 km/jam, 225.5 N pada 15 km/jam, dan 370.4 N pada 20 km/jam. Karakteristik gaya redam untuk sistem HMERSA dari hasil simulasi sebesar 119.4 N pada kecepatan 10 km/jam, 235.1 N pada 15 km/jam, dan 388.8 N pada 20 km/jam. Semakin tinggi kecepatan kendaraan, semakin besar gaya redam yang dihasilkan. Kemudian didapatkan daya bangkitan untuk sistem HMERSA dari hasil simulasi, yaitu 5.03 W pada kecepatan 10 km/jam, 10.93 W pada 15 km/jam, dan 19.07 W pada 20 km/jam. Untuk hasil pengujian, didapatkan respon percepatan untuk shock absorber konvensional sebesar  $0.012 \text{ m/s}^2$  pada kecepatan 10 km/jam,  $0.064 \text{ m/s}^2$  pada 15 km/jam, dan  $0.068 \text{ m/s}^2$  pada 20 km/jam. Respon percepatan untuk sistem HMERSA dari hasil pengujian, yaitu  $0.0136 \text{ m/s}^2$  pada kecepatan 10 km/jam,  $0.0268 \text{ m/s}^2$  pada 15 km/jam, dan  $0.0308 \text{ m/s}^2$  pada 20 km/jam. Semakin tinggi kecepatan kendaraan, semakin besar respon percepatan yang terjadi. Kemudian tegangan bangkitan untuk sistem HMERSA dari hasil pengujian, yaitu sebesar 0.298 V pada kecepatan 10 km/jam, 0.353 V pada 15 km/jam, dan 0.407 V pada 20 km/jam. Semakin tinggi kecepatan kendaraan, semakin besar tegangan bangkitan yang dihasilkan.

**Kata kunci:** energi bangkitan, *hydroelectric power generator*, karakteristik gaya redam, *regenerative shock absorber*, respon percepatan.

# **DEVELOPMENT AND CHARACTERISTIC ANALYSIS OF HYDRO-MAGNETO-ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HMERSA) USING HYDROELECTRIC POWER GENERATOR**

**Name** : Didi Bahari  
**NRP** : 2113100103  
**Department** : Mechanical Engineering ITS  
**Thesis Advisor** : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T.,  
**M. Eng.**

## **ABSTRACT**

*According to classical physics of matter, a book written by Bolton, the total efficiency in a vehicle which uses fossil fuel as the source of energy to move is about 30%. One of the research done to maximize vehicle's efficiency is about the development of hydro-magneto-electric regenerative shock absorber (HMERSA). The goals of the research itself is to develop a HMERSA prototype for freight vehicle, damping force characteristic of conventional shock absorber and HMERSA while hitting a bump, and to find out about the amount of energy generated by the HMERSA system while hitting a bump.*

*The HMERSA system developed in this thesis will be implemented in a quarter car using hydraulic pipes assembly to connect the shock absorber to hydroelectric power generator. This system is developed to reduce the losses caused by gear mesh referring to the previous thesis. In this thesis, simulation of conventional shock absorber and HMERSA system in a quarter car will be conducted using MATLAB Simulink software. The simulation shows the damping force characteristic of conventional shock absorber and HMERSA system, and also the amount of energy generated by the HMERSA system. The vehicle used for the testing is a freight vehicle, which is Daihatsu Gran Max. The test*

is conducted with the vehicle velocity of 10 km/h, 15 km/h, and 20 km/h.

The results of the simulation and testing in this thesis is the damping force characteristic of conventional shock absorber from the simulation is 115.8 N at 10 km/h, 225 N at 15 km/h, and 370.4 N at 20 km/h. The damping force characteristic of the HMERSA system from the simulation is 119.4 N at 10 km/h, 235.1 N at 15 km/h, and 388.8 N at 20 km/h. these data shows that the higher the velocity, the higher damping force will be generated. The energy generated by the HMERSA system from the simulation is 5.03 W at 10 km/h, 10.93 W at 15 km/h, and 19.07 W at 20 km/h. The results of the testing in a freight vehicle is the acceleration response of the conventional shock absorber is 0.012 m/s<sup>2</sup> at 10 km/h, 0.064 m/s<sup>2</sup> at 15 km/h, and 0.068 m/s<sup>2</sup> at 20 km/h. The acceleration response of the HMERSA system is 0.0136 m/s<sup>2</sup> at 10 km/h, 0.0268 m/s<sup>2</sup> at 15 km/h, and 0.0308 m/s<sup>2</sup> at 20 km/h. These data show that the higher the velocity, the higher the acceleration response of a shock absorber. The energy generated from the testing of HMERSA system is 0.298 V at 10 km/h, 0.353 V at 15 km/h, and 0.407 V at 20 km/h. These data show that the higher the vehicle velocity, the higher the voltage generated by HMERSA system.

**Keywords:** *acceleration response, damping force characteristics, generated energy, hydroelectric power generator, regenerative shock absorber.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat, penyertaan, dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik. Tugas akhir merupakan salah satu mata kuliah wajib dalam studi strata-1 (S-1) di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penyelesaian penulisan laporan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu dalam pembuatan laporan tugas akhir ini, antara lain:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang selalu memberkati selama pengerjaan tugas akhir hingga selesainya pembuatan laporan ini.
2. Orang tua dari penulis yang mendukung selama pengerjaan tugas akhir.
3. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M. Eng. sebagai dosen pembimbing tugas akhir yang telah membimbing dalam menyelesaikan laporan tugas akhir.
4. Teman riset bimbingan bapak Harus yang senantiasa membantu dan menghibur saat pengambilan data ataupun penulisan tugas akhir.
5. Saelly Melinda yang selalu memberikan dukungan, motivasi, dan semangat selama pengerjaan tugas akhir.
6. Serta semua pihak yang tidak disebutkan.

Penulis berharap bahwa laporan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, 16 Januari 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	<b>xiv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Sistem Suspensi Hidrolik .....	5
2.2 Sistem Suspensi <i>Regenerative</i> .....	7
2.2.1 Rack and Pinion Regenerative Shock absorber .....	7
2.2.2 Sistem Suspensi <i>Regenerative</i> dengan <i>Translation to Rotation Mechanism</i> .....	9
2.2.3 <i>Hydraulic Pumping Regenerative Suspension</i> .....	10
2.2.4 Electro-Hydraulic Regenerative Shock Absorber .....	12
2.2.5 Sistem Suspensi <i>Hydro-Magneto-Electric Regenerative Shock absorber (HMERSA)</i> .....	14
2.3 Motor Hidrolik .....	15
2.4 Generator Listrik .....	17
2.5 Teori Mekanisme Hidrolik dan Mekanika Fluida .....	19
2.5.1 Persamaan Bernoulli .....	19
2.5.2 Hukum Konservasi Massa .....	21
2.5.3 <i>Head Loss</i> .....	22
2.5.4 <i>T-Junction</i> .....	25
2.6 <i>Relative Motion of Base</i> .....	27

<b>BAB III METODOLOGI .....</b>	<b>29</b>
3.1 Metodologi Penelitian .....	29
3.2 Tahapan Studi Literatur .....	31
3.3 Data Parameter Peredam Getaran.....	33
3.4 Pemodelan Fisik dan Dinamis Sistem Peredam Getaran .....	34
3.4.1 Pemodelan Fisik Sistem Peredam Getaran Konvensional .....	34
3.4.2 Perancangan Fisik dan Cara Kerja Sistem HMERSA .....	35
3.4.3 Pemodelan Dinamis Sistem Peredam Getaran Konvensional .....	37
3.4.4 Pemodelan Dinamis Sistem HMERSA dengan <i>Hydroelectric Power Generator</i> .....	42
3.5 Persamaan Matematis Sistem HMERSA pada Seperempat Kendaraan .....	43
3.6 Pembuatan Blok Diagram dan Analisis Grafik .....	46
3.7 Pembuatan Sistem HMERSA .....	46
3.8 Implementasi dan Pengujian pada Kendaraan .....	49
3.9 Analisis Hasil Pengujian .....	49
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>51</b>
4.1 Simulasi pada <i>Software</i> MATLAB Simulink .....	51
4.1.1 Parameter Simulasi .....	51
4.1.2 Hasil Simulasi <i>Shock Absorber</i> Konvensional dengan Variasi <i>Input</i> Frekuensi .....	51
4.1.3 Hasil Simulasi Sistem HMERSA dengan Variasi <i>Input</i> Frekuensi .....	54
4.1.4 Perbandingan Hasil Simulasi <i>Shock Absorber</i> Konvensional dengan Sistem HMERSA .....	59
4.2 Pengujian Sistem HMERSA pada Kendaraan Angkut .....	64
4.2.1 Pemasangan Sistem HMERSA pada Kendaraan Angkut .....	65
4.2.2 Instalasi Peralatan Pengambilan Data .....	67

4.2.3 Pengambilan Data .....	70
4.3 Analisis Hasil Pengambilan Data .....	71
4.3.1 Analisis Respon Percepatan <i>Shock Absorber</i> Konvensional .....	40
4.3.2 Perbandingan Respon Percepatan <i>Shock Absorber</i> Konvensional dengan Variasi Kecepatan Kendaraan .....	74
4.3.3 Analisis Respon Percepatan HMERSA.....	75
4.3.4 Perbandingan Respon Percepatan HMERSA dengan Variasi Kecepatan Kendaraan .....	77
4.3.5 Perbandingan Respon Percepatan <i>Shock Absorber</i> Konvensional dengan HMERSA pada Kecepatan 10 km/jam .....	79
4.3.6 Perbandingan Respon Percepatan <i>Shock Absorber</i> Konvensional dengan HMERSA pada Kecepatan 15 km/jam .....	80
4.3.7 Perbandingan Respon Percepatan <i>Shock Absorber</i> Konvensional dengan HMERSA pada Kecepatan 20 km/jam .....	82
4.3.8 Analisis Tegangan Bangkitan oleh <i>Hydroelectric Power Generator</i> pada Sistem HMERSA .....	83
4.3.9 Perbandingan Tegangan Bangkitan HMERSA pada Kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam .....	85
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>89</b>
5.1 Kesimpulan .....	89
5.2 Saran .....	90
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>91</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>93</b>
<b>BIODATA PENULIS</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Shock Absorber</i> Hidrolik .....	5
Gambar 2.2	Struktur Internal <i>Shock Absorber</i> .....	6
Gambar 2.3	Grafik Respon Karakteristik Redaman Terhadap Perpindahan dan Kecepatan .....	7
Gambar 2.4	Regenerative Shock absorber dengan Sistem Rack and Pinion .....	8
Gambar 2.5	Skema Alat Sistem Suspensi <i>Regenerative</i> dengan <i>Translation to Rotation Mechanism</i> .....	9
Gambar 2.6	Grafik Simulasi Energi Bangkitan Terhadap <i>Damping Coefficient</i> .....	10
Gambar 2.7	Skema Alat Hydraulic Pumping Regenerative Suspension .....	11
Gambar 2.8	Grafik Energi Bangkitan Terhadap Waktu pada Input Frekuensi 1.67 HZ dan Amplitudo Perpindahan Sebesar 50 mm .....	12
Gambar 2.9	Skema Aliran Fluida pada <i>Shock Absorber</i> .....	13
Gambar 2.10	Grafik Gaya Redam Terhadap Perpindahan .....	13
Gambar 2.11	Skema Sistem HMERSA dengan <i>Dual Input Single Output</i> pada Suspensi <i>Half Car</i> .....	15
Gambar 2.12	Motor Hidrolik dengan Generator .....	16
Gambar 2.13	<i>Blade</i> dari Motor Hidrolik .....	16
Gambar 2.14	Skema RL <i>Circuit</i> untuk Generator .....	18
Gambar 2.15	Penerapan Hukum Bernoulli pada Sebuah Pipa ..	20
Gambar 2.16	Ilustrasi Hukum Kekekalan Massa pada Sambungan Pipa .....	21
Gambar 2.17	<i>Loss coefficient</i> untuk Aliran Melalui Perubahan <i>Sudden Area Change</i> .....	24
Gambar 2.18	Coefficient of Losses untuk Kasus Combining Flow pada T-junction .....	26
Gambar 2.19	Coefficient of losses pada Dividing Flow .....	27
Gambar 2.20	Seperempat Kendaraan yang Melewati Jalanan Kasar .....	27
Gambar 3.1	Diagram Alir Penyelesaian Tugas Akhir .....	30

Gambar 3.2	Sistem HMERSA Hasil Pengembangan Penelitian Terdahulu .....	32
Gambar 3.3	Model Fisik <i>Shock absorber</i> Konvensional .....	34
Gambar 3.4	Skema Kerja Sistem HMERSA dengan <i>Hydroelectric Power Generator</i> pada Kondisi Kompresi .....	35
Gambar 3.5	Skema Kerja Sistem HMERSA dengan <i>Hydroelectric Power Generator</i> pada Kondisi Ekspansi .....	36
Gambar 3.6	Model Dinamis <i>Shock Absorber</i> .....	38
Gambar 3.7	Model Dinamis Poros Sistem HMERSA .....	42
Gambar 3.8	<i>Free Body Diagram</i> Sistem HMERSA pada Seperempat Kendaraan .....	44
Gambar 3.9	<i>Free Body Diagram</i> Massa <i>Sprung</i> pada Seperempat Kendaraan .....	44
Gambar 3.10	<i>Free Body Diagram</i> Massa <i>Unsprung</i> pada Seperempat Kendaraan .....	45
Gambar 3.11	Desain Konstruksi HMERSA dengan <i>Hydroelectric Power Generator</i> .....	47
Gambar 3.12	Konstruksi HMERSA Tampak Depan dan Samping .....	48
Gambar 4.1	Grafik Gaya Redam Terhadap Perpindahan <i>Shock Absorber</i> Konvensional .....	52
Gambar 4.2	Grafik Gaya Redam Terhadap Kecepatan <i>Shock Absorber</i> Konvensional .....	53
Gambar 4.3	Grafik Gaya Redam Terhadap Perpindahan Sistem HMERSA .....	55
Gambar 4.4	Grafik Gaya Redam Terhadap Kecepatan Sistem HMERSA .....	56
Gambar 4.5	Grafik Perbandingan Simulasi (a) Tegangan Bangkitan, (b) Arus Listrik, (c) Daya Bangkitan pada sistem HMERSA .....	58
Gambar 4.6	Grafik Perbandingan Gaya Redam Terhadap Perpindahan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, (c) 20 km/jam .....	61

Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Gaya Redam Terhadap Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, (c) 20 km/jam .....	63
Gambar 4.8 Sistem HMERSA .....	64
Gambar 4.9 Bagian Bawah Bak Daihatsu Gran Max .....	65
Gambar 4.10 HMERSA yang Terpasang pada Kendaraan Angkut .....	66
Gambar 4.11 <i>Oscilloscope</i> Tektronix TBS1104 .....	67
Gambar 4.12 <i>Converter</i> Tegangan DC ke AC .....	68
Gambar 4.13 <i>Inverter</i> .....	68
Gambar 4.14 Probe Accelerometer .....	69
Gambar 4.15 <i>Probe</i> Tegangan .....	69
Gambar 4.16 Instalasi Peralatan Pengambilan Data .....	70
Gambar 4.17 Grafik Respon Percepatan <i>Shock Absorber</i> Konvensional Terhadap Waktu pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, (c) 20 km/jam .....	73
Gambar 4.18 Grafik Perbandingan Respon Percepatan pada <i>Shock Absorber</i> Konvensional (10 km/jam, 15 km/jam, 20 km/jam) .....	75
Gambar 4.19 Grafik Respon Percepatan Sistem HMERSA Terhadap Waktu pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, (c) 20 km/jam .....	77
Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Respon Percepatan pada HMERSA (10 km/jam, 15 km/jam, 20 km/jam) .....	78
Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Respon Percepatan pada <i>Shock Absorber</i> Konvensional dengan HMERSA (10 km/jam) .....	79
Gambar 4.22 Grafik Perbandingan Respon Percepatan pada <i>Shock Absorber</i> Konvensional dengan HMERSA (15 km/jam) .....	81
Gambar 4.23 Grafik Perbandingan Respon Percepatan pada <i>Shock Absorber</i> Konvensional dengan HMERSA (20 km/jam) .....	82

Gambar 4.24 Grafik Tegangan Bangkitan Terhadap Waktu pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, (c) 20 km/jam .....	85
Gambar 4.25 Grafik Perbandingan Tegangan Bangkitan Terhadap Waktu (10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam) .....	86
Gambar A.1 Grafik Respon Percepatan <i>Shock Absorber</i> Konvensional Terhadap Waktu pada Kecepatan 10 km/jam .....	93
Gambar A.2 Grafik Respon Percepatan <i>Shock Absorber</i> Konvensional Terhadap Waktu pada Kecepatan 15 km/jam .....	93
Gambar A.3 Grafik Respon Percepatan <i>Shock Absorber</i> Konvensional Terhadap Waktu pada Kecepatan 20 km/jam .....	94
Gambar A.4 Grafik Respon Percepatan HMERSA Terhadap Waktu pada Kecepatan 10 km/jam .....	94
Gambar A.5 Grafik Respon Percepatan HMERSA Terhadap Waktu pada Kecepatan 15 km/jam .....	95
Gambar A.6 Grafik Respon Percepatan HMERSA Terhadap Waktu pada Kecepatan 20 km/jam .....	95

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Energi Bangkitan yang Dihasilkan dengan Variasi Amplitudo dan Frekuensi .....	8
Tabel 3.1 Data Parameter Sistem Suspensi Konvensional dan HMERSA .....	33
Tabel 4.1 Perbandingan Simulasi Nilai Energi Bangkitan pada Sistem HMERSA .....	59
Tabel 4.2 Perbandingan Simulasi Gaya Redam <i>Shock Absorber</i> Konvensional terhadap Sistem HMERSA .....	62
Tabel 4.3 Perbandingan Respon Percepatan Maksimum <i>Shock Absorber</i> Konvensional .....	74
Tabel 4.4 Perbandingan Respon Percepatan Maksimum HMERSA .....	78
Tabel 4.5 Perbandingan Nilai Respon Percepatan pada <i>Shock Absorber</i> Konvensional dengan HMERSA (10 km/jam) .....	80
Tabel 4.6 Perbandingan Nilai Respon Percepatan pada <i>Shock Absorber</i> Konvensional dengan HMERSA (15 km/jam) .....	81
Tabel 4.7 Perbandingan Nilai Respon Percepatan pada <i>Shock Absorber</i> Konvensional dengan HMERSA (20 km/jam) .....	83
Tabel 4.8 Perbandingan Tegangan Bangkitan Maksimum (10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam) .....	87

## DAFTAR SIMBOL

$D_p$	= diameter piston <i>rod</i>
$D_k$	= diameter kompresi
$D_e$	= diameter ekspansi
$D_p$	= diameter piston
$\omega$	= kecepatan putaran motor hidrolis (rad/s)
$T_m$	= torsi motor hidrolis (N.m)
$Q_m$	= debit aliran fluida yang masuk ke motor hidrolis ( $m^3/s$ )
$q$	= perpindahan motor hidrolis (cc/rev)
$p_m$	= tekanan pada motor hidrolis (Pa)
$\eta_v$	= efisiensi volumetrik
$\eta_m$	= efisiensi mekanik
$V_e$	= <i>electromotive voltage</i> (Volt)
$L$	= induktansi internal (Henries)
$I$	= arus (Ampere)
$k_v$	= <i>voltage coefficient</i> (V.s/rad)
$T_e$	= torsi elektrik (N.m)
$N$	= jumlah lilitan
$B$	= induksi magnetik (Tesla)
$l$	= panjang kumparan (m)
$a$	= jarak kepada kawat (m)
$k_t$	= koefisien torsi elektrik (N.m/Ampere)
$p_1$	= tekanan fluida pada kondisi 1 ( $N/m^2$ )
$p_2$	= tekanan fluida pada kondisi 2 ( $N/m^2$ )
$v_1$	= 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 ( $9.8 m/s^2$ )
$\rho$	= massa jenis fluida ( $kg/m^3$ )

$\Psi$	= volume fluida ( $m^3$ )
$\vec{V}$	= kecepatan ( $m/s$ )
$A$	= luas area ( $m^2$ )
$h_1$	= <i>major head loss</i> ( $m$ )
$L$	= panjang pipa ( $m$ )
$d_{tube}$	= diameter pipa ( $m$ )
$\dot{x}$	= kecepatan aliran ( $m/s$ )
$Re$	= <i>reynold number</i>
$\nu$	= viskositas kinematik fluida ( $m^2/s$ )
$h_{lm}$	= <i>minor head loss</i>
$K$	= <i>loss coefficient</i>
$\Delta H_{Tv}$	= selisih <i>head</i> antara <i>approach flow</i> dan <i>downstream flow</i> ( $m/s^2$ )
$V$	= kecepatan <i>head</i> ( $m/s^2$ )
$\xi_{tv}$	= <i>coefficient of losses</i>
$Q_z$	= Debit aliran <i>approach branches</i> ( $m^3/s$ )
$Q_u$	= Debit aliran <i>downstream branches</i> ( $m^3/s$ )
$G$	= Data yang akan diolah (V)
$V$	= Sensitivitas accelerometer (0.05 Volt)
$g$	= Percepatan gravitasi ( $9.81 m/s^2$ )
$f$	= Frekuensi eksitasi yang diberikan (Hz)

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam kehidupan sehari-hari, manusia membutuhkan bantuan mesin ataupun kendaraan untuk melakukan aktivitas. Kendaraan sekarang pun sudah banyak yang mengadopsi teknologi-teknologi terbaru yang fungsinya untuk meningkatkan efisiensi dan juga meminimalisir energi yang terbuang dari kendaraan. Dalam sebuah kendaraan yang menggunakan sumber bahan bakar fosil, nilai efisiensi keseluruhan sistem berkisar 30%<sup>[1]</sup>. Artinya, sekitar 70% biaya yang digunakan untuk membeli bahan bakar terbuang ke dalam bentuk lain selain untuk menggerakkan kendaraan, seperti energi panas, dan energi-energi lainnya.

Salah satunya adalah penelitian untuk meningkatkan nilai efisiensi kendaraan dilakukan oleh Zhang<sup>[2]</sup> yang mengembangkan sistem suspensi *regenerative hydraulic* dengan *energy recovery unit* dan aktuator hidrolik. Dalam penelitian tersebut, daya optimal regenerasi didapatkan sebesar 33.4 W pada setiap suspensi<sup>[2]</sup>. Kemudian penelitian mengenai sistem suspensi *regenerative* juga dilakukan oleh Huang<sup>[10]</sup>. Sistem *regenerative* yang dikembangkan oleh Huang memiliki prinsip kerja *translation to rotation mechanism*, yaitu memanfaatkan gerakan translasi dari *shock absorber* yang mendapatkan gaya dari *bump*, dan mengubah gerakan tersebut menjadi gerakan rotasi dengan menggunakan *ball screw*. Hasil dari penelitian Huang didapatkan energi bangkitan dari suspensi *regenerative* sebesar 10W dengan *damping coefficient* sebesar 2300 Ns/m<sup>[10]</sup>. Penelitian lain yang berhubungan dengan sistem suspensi *regenerative* adalah penelitian dari Xie<sup>[11]</sup>, yang mengembangkan sistem suspensi *regenerative* dengan batang *piezoelectric*. Batang *piezoelectric* yang dapat menghasilkan energi listrik ketika dikenakan gaya dari luar dipasang pada bagian bawah sistem suspensi. Hasil

dari penelitian Xie ini adalah sistem suspensi *regenerative* tersebut mampu menghasilkan daya listrik sampai dengan 738 W dengan ukuran lebar batang *piezoelectric* sebesar 0.015 m dan tinggi 0.1 m<sup>[11]</sup>.

Penelitian yang sama juga pernah dilakukan oleh beberapa mahasiswa jurusan Teknik Mesin ITS. Penelitian sebelumnya mengembangkan sistem *hydro-magneto-electric regenerative shock absorber* (HMERSA). Sistem HMERSA tersebut terdiri dari *shock absorber* yang dihubungkan dengan pipa menuju ke motor hidrolik, sehingga fluida yang berada di dalam *shock absorber* bersirkulasi saat melewati *bump* dan memutar motor hidrolik. Motor hidrolik tersebut terhubung dengan pasangan roda gigi untuk memutar generator, dan menghasilkan daya. Untuk penelitian kali ini, pasangan motor hidrolik dan generator yang dihubungkan dengan roda gigi akan diganti dengan *hydroelectric power generator*. Alat tersebut memiliki motor hidrolik dan generator yang sudah tergabung dalam satu mesin, sehingga dapat mengurangi *losses* yang terjadi dari *mesh* roda gigi. Dengan pengurangan *losses* yang terjadi pada sistem HMERSA, diharapkan untuk mendapatkan energi bangkitan yang lebih besar dari penelitian-penelitian sebelumnya.

## 1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik gaya redam dan respon percepatan pada sistem *shock absorber* konvensional saat melewati *bump*?
2. Bagaimana karakteristik gaya redam dan respon percepatan pada sistem HMERSA saat melewati *bump*?
3. Berapa besar energi listrik bangkitan yang dihasilkan sistem HMERSA pada kendaraan angkut saat melewati *bump*?

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah:

1. Simulasi dilakukan pada seperempat kendaraan (*quarter car*).
2. Kendaraan yang digunakan adalah kendaraan angkutan barang.
3. Aliran fluida kerja pada silinder hidrolik diasumsikan *incompressible flow*.
4. Persamaan generator yang digunakan adalah persamaan yang telah dilinierkan.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mengembangkan *prototype* HMERSA untuk digunakan pada kendaraan angkut.
2. Mengetahui karakteristik gaya redam dan respon percepatan pada sistem *shock absorber* konvensional saat melewati *bump*.
3. Mengetahui karakteristik gaya redam, energi listrik bangkitan, dan respon percepatan pada sistem HMERSA saat melewati *bump*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari tugas akhir ini adalah:

1. Memberikan data mengenai karakteristik gaya redam dan energi listrik bangkitan pada sistem HMERSA.
2. Berkembangnya sistem suspensi *regenerative* pada kendaraan angkut sehingga meningkatkan efisiensi kendaraan dan pemanfaatan energi terbuang secara maksimal.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

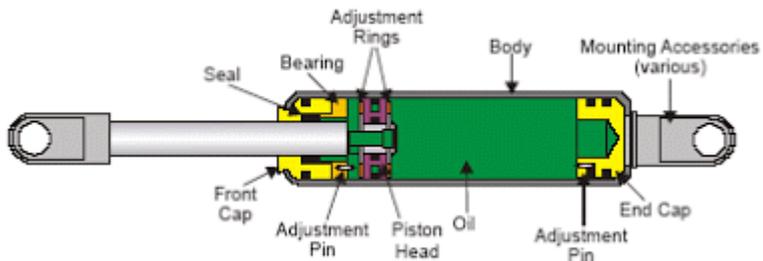
#### **2.1 Sistem Suspensi Hidrolik**

Sistem suspensi pada kendaraan angkut modern mayoritas menggunakan suspensi hidrolik. Sistem suspensi hidrolik banyak digunakan karena memiliki struktur yang sederhana, mudah dipasang dan dilepas, dan dapat dipasang pada orientasi yang berbeda-beda<sup>[3]</sup>. Komponen dari sistem suspensi yang berfungsi sebagai peredam getaran atau gaya dari luar adalah *shock absorber*. Di dalam sebuah *shock absorber* terdapat beberapa komponen seperti piston, *orifice*, *valve*, dan fluida kerja oli suspensi.



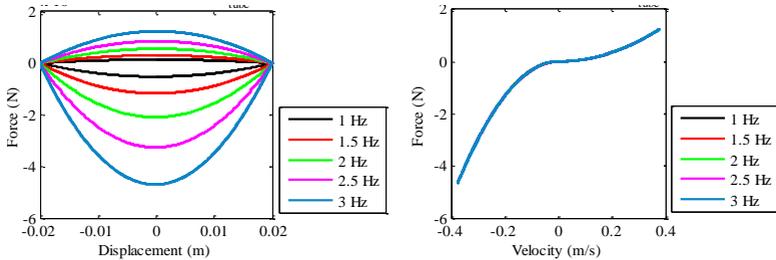
Gambar 2.1 *Shock absorber* Hidrolik

Cara kerja *shock absorber* adalah dengan gerakan kompresi dan ekspansi. Gerakan kompresi terjadi ketika kendaraan melewati *bump* sehingga memberikan gaya dorong kepada *shock absorber* dan mendorong piston ke bawah. Saat piston tertekan ke bawah, fluida kerja oli suspensi dengan nilai viskositas tertentu menahan gerak piston, sehingga gaya dari *bump* pun dapat di redam. Sebaliknya, gerakan ekspansi terjadi dengan piston yang bergerak ke atas, dan kemudian mendapat gaya hambat dari oli suspensi sehingga terjadi gaya redam.



Gambar 2.2 Struktur Internal *Shock absorber*

Siklus kompresi dan ekspansi pada suatu sistem *shock absorber* kemudian digunakan untuk mencari karakteristik redaman terhadap perpindahan dan kecepatan dari *shock absorber*. Karakteristik redaman dicari untuk mengetahui jenis-jenis suspensi yang sesuai dengan penggunaannya pada kendaraan, seperti untuk kenyamanan, mobil sport, dan lain-lain. Karakteristik redaman pada suatu *shock absorber* ditampilkan dalam bentuk grafik seperti penelitian yang dilakukan oleh Farisah<sup>[9]</sup>, ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Grafik Respon Karakteristik Redaman Terhadap Perpindahan dan Kecepatan<sup>[9]</sup>

## 2.2 Sistem Suspensi *Regenerative*

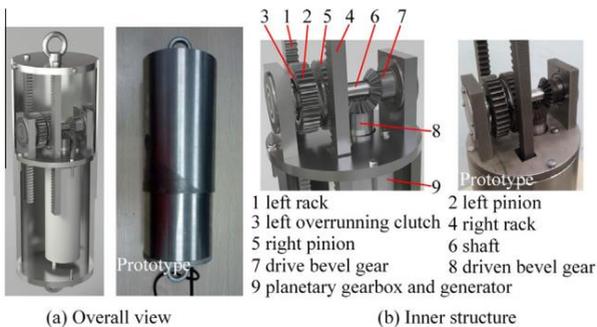
Untuk menjaga kenyamanan suatu kendaraan, digunakan sistem suspensi untuk mengurangi redaman ketika melewati jalan yang berlubang atau tidak rata. Suatu kendaraan bermotor hanya memiliki nilai efisiensi sebesar 30%<sup>[1]</sup>. Dengan nilai efisiensi yang rendah tersebut, penelitian-penelitian pada kendaraan sudah berfokus pada peningkatan nilai efisiensi pada suatu kendaraan. Salah satu penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensi yaitu dengan menggunakan sistem suspensi *regenerative*. Sistem suspensi *regenerative* hasil penelitian terdahulu terdiri dari berbagai jenis yaitu:

### 2.2.1 *Rack and Pinion Regenerative Shock Absorber*

Pada tahun 2016, Zhang<sup>[4]</sup> menemukan bahwa *regenerative shock absorber* (RSA) mampu untuk memanfaatkan energi yang terbuang yang ada dalam sistem suspensi kendaraan. Penelitian dari Zhang tersebut menggunakan sistem *rack and pinion*, dimana peralatan yang digunakan adalah *shock absorber* yang di dalamnya telah dimodifikasi sedemikian rupa sehingga dapat dimasukkan susunan roda gigi. Sistem suspensi tersebut memanfaatkan gesekan antara *gear* tersebut untuk mendapatkan gaya redam ketika kendaraan melewati jalan yang berlubang ataupun *bump*. Ketika kendaraan melewati *bump*, *shock absorber* akan mengalami kompresi dan ekspansi. Gerak inilah yang

menggerakkan roda gigi pada arah putaran yang sama dan memutar generator, sehingga menghasilkan energi listrik.

Eksperimen *shock absorber* dengan sistem *rack and pinion* ini dilakukan pada skala laboratorium dengan peralatan eksperimen seperti Bionix 858 *material testing system*, *oscilloscope* untuk membaca sinyal tegangan dari generator, dan sensor perpindahan untuk mengetahui perpindahan dari *shock absorber*.



Gambar 2.4 *Regenerative Shock absorber* dengan Sistem *Rack and Pinion*.

Tabel 2.1 Energi Bangkitan yang Dihasilkan dengan Variasi Amplitudo dan Frekuensi<sup>[4]</sup>

	<b>1 Hz (W)</b>	<b>1.5 Hz (W)</b>	<b>2 Hz (W)</b>	<b>2.5 Hz (W)</b>
<b>2.5 mm</b>	0.057	0.147	0.300	0.522
<b>5 mm</b>	0.273	0.555	1.113	1.995
<b>7.5 mm</b>	0.558	1.293	2.310	4.302

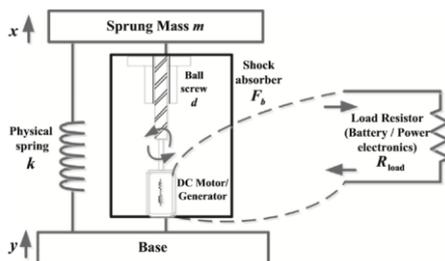
Dari penelitian Zhang ini didapatkan bahwa *regenerative shock absorber* dengan *rack and pinion* mampu memberikan peredaman untuk kendaraan penumpang pada umumnya. Energi bangkitan yang dapat dihasilkan yaitu rata-rata sebesar 4.302 W,

dengan input frekuensi 2.5 Hz dan amplitudo 7.5 mm. Efisiensi mekanik rata-rata untuk *shock absorber* tersebut sebesar 44.24%.

### 2.2.2 Sistem Suspensi *Regenerative* dengan *Translation to Rotation Mechanism*

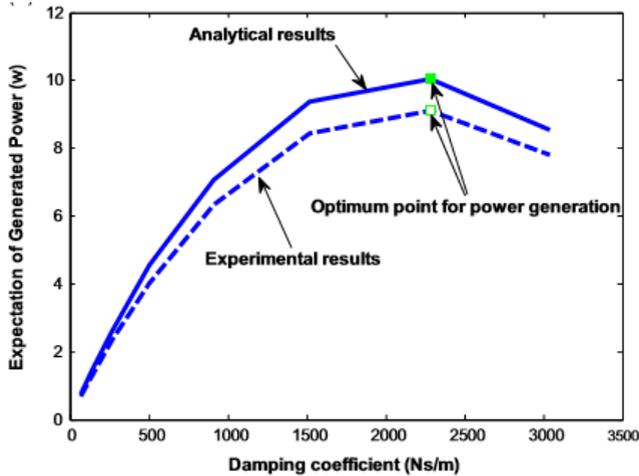
Sistem suspensi *regenerative* ini dikembangkan oleh Huang dan kawan-kawan<sup>[10]</sup>. Sistem suspensi ini memiliki prinsip kerja yaitu dengan memanfaatkan gerakan translasi dari *shock absorber* yang melewati *bump*, dan gerakan translasi tersebut digunakan untuk memutar generator yang terletak di bagian bawah tabung *shock absorber*. Untuk mengubah gerakan translasi menjadi gerakan rotasi, di dalam *shock absorber* dipasang sebuah *ball screw* yang memiliki ulir sehingga ketika piston dari *shock absorber* bergerak naik ataupun turun, piston akan berputar mengikuti ulir *ball screw* dan kemudian memutar generator.

Komponen-komponen yang digunakan dalam penelitian ini adalah *shock absorber* yang bagian dalamnya telah dimodifikasi sedemikian rupa agar komponen *regenerative* dapat dimasukkan ke dalam, *ball screw*, *low power switch-mode rectifier* yang digunakan untuk mengatur hambatan pada rangkaian listrik sehingga dapat mengatur gaya redam pada *shock absorber*. Skema alat sistem suspensi *regenerative* tersebut dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Skema Alat Sistem Suspensi *Regenerative* dengan *Translation to Rotation Mechanism*

Hasil yang didapatkan dari penelitian dari Huang ini adalah grafik *damping coefficient* terhadap energi bangkitan yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada gambar 2.6. Pengujian tersebut dilakukan pada *shock absorber test rig* dengan mensimulasikan jalan perkotaan dengan karakter suspensi yang lembut. Dari *test rig* didapatkan hasil simulasi berupa energi bangkitan terbesar yaitu 10W pada *damping coefficient* sebesar 2300 Ns/m.

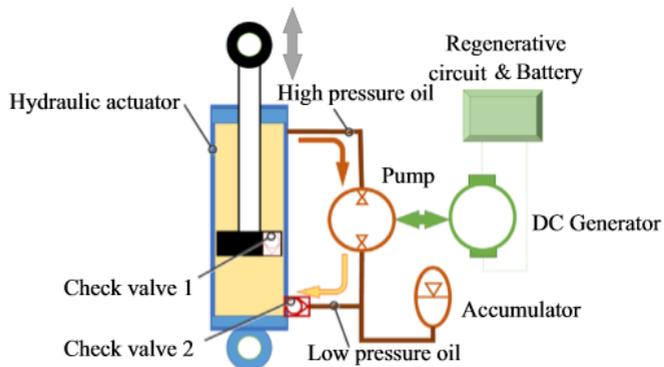


Gambar 2.6 Grafik Simulasi Energi Bangkitan Terhadap *Damping Coefficient*<sup>[10]</sup>

### 2.2.3 Hydraulic Pumping Regenerative Suspension

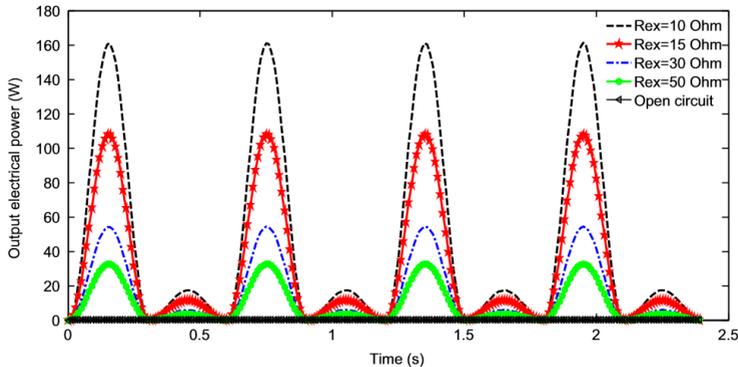
Penelitian mengenai sistem HMERSA sudah pernah dilakukan oleh sekelompok peneliti dari Jilin University, Hunan University, dan Tsinghua University pada tahun 2014. Penelitian dari Zhang dan kawan-kawan<sup>[2]</sup> tersebut melakukan simulasi mengenai sistem suspensi hidrolik *regenerative*. Simulasi dilakukan dengan skema alat yaitu *shock absorber* yang telah dimodifikasi dan dilubangi pada bagian atas (ekspansi) dan bagian bawah (kompresi). Lubang tersebut berfungsi untuk mengalirkan

oli suspensi yang tertekan ketika melewati *bump*. Oli suspensi tersebut mengalir dengan satu arah menggunakan *check valve*, sehingga bisa memutar motor hidrolik, dan kemudian memutar generator DC. Simulasi tersebut dilakukan dengan menggunakan parameter-parameter pada sebuah mobil *sport utility vehicle* (SUV). Skema alat pada penelitian Zhang dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Skema Alat *Hydraulic Pumping Regenerative Suspension*<sup>[2]</sup>

Hasil dari simulasi yang dilakukan oleh Zhang yaitu didapatkan nilai optimal energi bangkitan dari sistem *regenerative* tersebut adalah sebesar 33.4 W untuk setiap suspensi *regenerative* pada gaya eksternal sebesar 14.7  $\Omega$ , input frekuensi sebesar 1.67 Hz, dan amplitudo perpindahan sebesar 50 mm. Penelitian juga menyimpulkan bahwa gaya redam pada sistem suspensi hidrolik *regenerative* berhubungan dengan besarnya hambatan listrik dan input frekuensi.

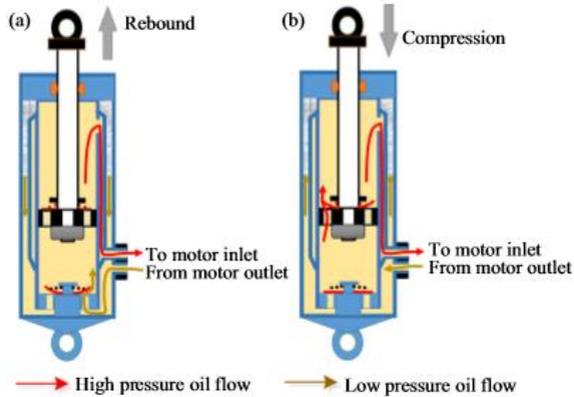


Gambar 2.8 Grafik Energi Bangkitan Terhadap Waktu pada Input Frekuensi 1.67 HZ dan Amplitudo Perpindahan Sebesar 50 mm

#### 2.2.4 *Electro-Hydraulic Regenerative Shock Absorber*

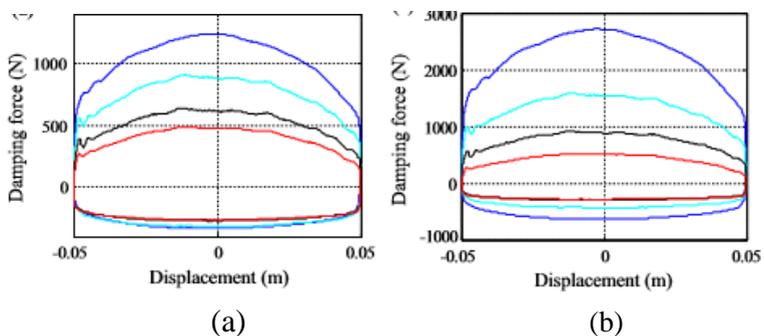
Salah satu penelitian terbaru yang membahas mengenai sistem suspensi *regenerative* dengan menggunakan fluida (hidrolik) dilakukan oleh Zhang<sup>[12]</sup> pada tahun 2017. *Electro-hydraulic regenerative shock absorber* yang dikembangkan oleh Zhang ini memanfaatkan tekanan dari piston saat melewati *bump*, dan mendorong oli suspensi untuk mengalir dan memutar motor hidrolik sehingga generator dapat menghasilkan energi listrik. Sistem suspensi *regenerative* ini memiliki prinsip kerja yang sama dengan sistem HMERSA, hanya saja *shock absorber* yang digunakan berbeda dari tugas akhir ini.

*Shock absorber* yang digunakan pada penelitian Zhang yaitu sebuah *shock absorber dual tube* yang telah dimodifikasi dengan penambahan suatu lubang pada bagian bawah *shock absorber*. Lubang tersebut memiliki dua saluran, yaitu saluran masuk dan keluar untuk oli suspensi. Eksperimen ini tidak dilakukan pada kendaraan, melainkan dilakukan pada sebuah *suspension test rig*, dengan mensimulasikan gerakan dari mobil *off-road*.



Gambar 2.9 Skema Aliran Fluida pada *Shock Absorber*

Hasil dari penelitian tersebut didapatkan grafik gaya redam terhadap *displacement* dan grafik energi bangkitan terhadap waktu pada kecepatan kendaraan 0.26 m/s dan 0.52 m/s. Pada kecepatan 0.26 m/s, didapatkan gaya redam sebesar 529 N sampai dengan 2720 N, dan energi bangkitan sebesar 3 W dengan hambatan listrik 100  $\Omega$ . Sedangkan pada kecepatan kendaraan 0.52 m/s, didapatkan gaya redam sebesar 928 N sampai dengan 5966 N, dan energi bangkitan sebesar 9.6 W dengan hambatan listrik 100  $\Omega$ .



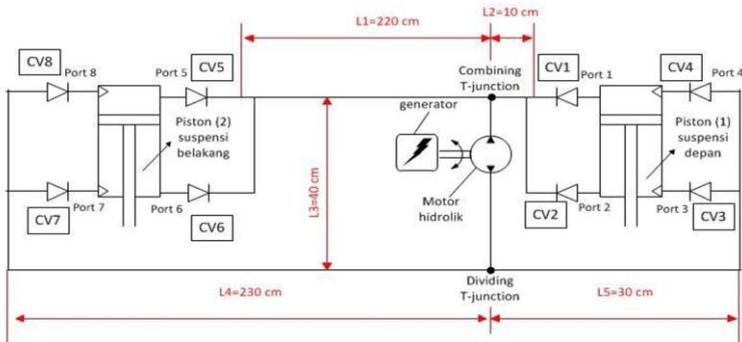
Gambar 2.10 Grafik Gaya Redam Terhadap Perpindahan Pada Kecepatan (a) 0.26 m/s dan (b) 0.52 m/s

### 2.2.5 Sistem Suspensi *Hydro-Magneto-Electric Regenerative Shock absorber* (HMERSA)

Penelitian mengenai sistem HMERSA pernah dilakukan dengan simulasi pada *software* MATLAB oleh Merlinnovi<sup>[5]</sup>. Penelitian ini dilakukan pada *half car*, sehingga ketika kendaraan melewati *bump* atau jalan yang tidak rata, oli suspensi pada kedua bagian roda akan menyuplai oli dan memutar motor hidrolik atau juga disebut sebagai *dual input single output*. Sistem HMERSA yang disimulasikan meliputi beberapa komponen seperti *check valve*, pipa, motor hidrolik, susunan roda gigi, dan generator. Skema sistem HMERSA dari penelitian Merlinnovi dapat dilihat pada gambar 2.11.

Cara kerja dari simulasi sistem HMERSA pada penelitian Merlinnovi yaitu ketika *shock absorber* mengalami gaya kompresi, oli suspensi akan tertekan dan mengalir melalui *check valve* 1 dan *check valve* 5. Oli kemudian masuk ke *T-junction* dan memutar motor hidrolik. Sedangkan untuk siklus ekspansi, oli suspensi akan tertekan dan mengalir melewati *check valve* 2 dan 6. Setelah itu, motor hidrolik akan memutar susunan roda gigi yang tersambung dengan generator listrik, sehingga menghasilkan energi listrik. Oli suspensi yang sudah melewati motor hidrolik kemudian kembali ke tabung *shock absorber* melalui *check valve* 6 dan 3.

Dari penelitian tersebut, didapatkan hasil dengan frekuensi 2,78 Hz dan amplitudo 2 cm, gaya redam dan energi bangkitan terbesar terjadi ketika kedua silinder hidrolik bergetar dengan beda fase 0°. Saat kedua silinder bergerak dengan beda fase 90°, gaya redam dan daya bangkitan yang dihasilkan lebih kecil namun stabil dan kontinyu. Kemudian pada simulasi sistem *half-car* memanjang kendaraan, daya bangkitan pada saat beda fase 0° lebih besar dibandingkan beda fase 90°. Daya bangkitan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan kendaraan. Daya terbesar terjadi pada kecepatan 80 km/jam yaitu sebesar 165 Watt pada beda fase 0° dan 122 Watt untuk beda fase 90°<sup>[5]</sup>.



Gambar 2.11 Skema Sistem HMERSA dengan *Dual Input Single Output* pada Suspensi *Half Car*<sup>[5]</sup>

### 2.3 Motor Hidrolik

Motor hidrolik adalah suatu alat yang digunakan untuk mengubah bentuk energi dari aliran fluida menjadi energi putar atau torsi. Dalam kerjanya, motor hidrolik memanfaatkan gaya dorong dari fluida dan perbedaan tekanan pada *blade* untuk memutar motor. Motor hidrolik memiliki fungsi yang berkebalikan dengan pompa hidrolik. Jika pompa hidrolik berfungsi untuk menghasilkan tekanan dan aliran tertentu pada suatu sistem hidrolik, maka motor hidrolik melakukan konversi kembali tekanan hidrolik menjadi tenaga putar. Motor hidrolik dapat bekerja pada dua arah putaran motor sesuai dengan kebutuhan penggunaan.

Motor hidrolik yang digunakan pada tugas akhir ini tergabung dalam satu unit alat dengan generator, dan dapat dilihat pada gambar 2.12. Motor hidrolik tersebut merupakan salah satu jenis turbin Kaplan, yaitu turbin yang memanfaatkan gaya dorong dari fluida untuk memutar rotor dan menghasilkan torsi<sup>[6]</sup>.



Gambar 2.12 Motor Hidrolik dengan Generator



Gambar 2.13 *Blade* dari Motor Hidrolik

Untuk analisis pada motor hidrolik, digunakan persamaan 2.1.

$$\omega = \frac{Q_m \eta_v}{q} \quad (2.1)$$

$$T_m = \Delta p_m q \eta_m \quad (2.2)$$

dimana

$\omega$	= kecepatan putaran motor hidrolik (rad/s)
$T_m$	= torsi motor hidrolik (N.m)
$Q_m$	= debit aliran fluida yang masuk ke motor hidrolik (m <sup>3</sup> /s)
$q$	= perpindahan motor hidrolik (cc/rev)
$p_m$	= tekanan pada motor hidrolik (Pa)
$\eta_v$	= efisiensi volumetrik
$\eta_m$	= efisiensi mekanik

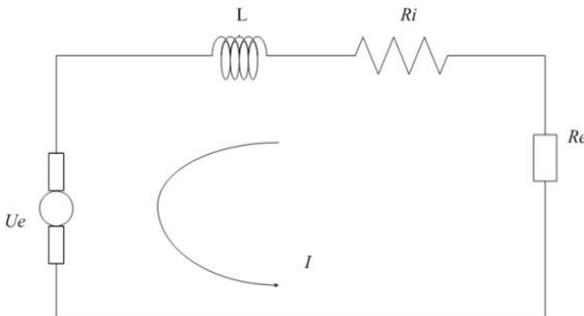
## 2.4 Generator Listrik

Generator merupakan alat yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik biasanya menggunakan induksi elektromagnetik. Dikutip dari tinjauan pustaka penelitian Farisah<sup>[9]</sup>, sebagaimana generator listrik bekerja, prinsipnya berkebalikan dengan motor listrik. Berdasarkan arus yang dihasilkan. Generator dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu generator AC dan generator DC. Generator AC menghasilkan arus bolak-balik (AC) dan generator DC menghasilkan arus searah (DC).

- Generator AC<sup>[9]</sup>; di mana bagian utama terdiri atas *magnet permanen (tetap)*, *kumparan (solenoida)*, *cincin geser*, dan *sikat*. Pada generator, perubahan garis gaya magnet diperoleh dengan cara memutar kumparan di dalam medan magnet permanen. Karena dihubungkan dengan cincin geser, perputaran kumparan menimbulkan GGL (Gaya

Gerak Listrik) induksi AC. Oleh karena itu, arus induksi yang ditimbulkan berupa arus AC.

- Generator DC; di mana generator ini terdiri dari dua bagian. Yang pertama adalah *stator*, yaitu bagian mesin DC yang diam/tidak bergerak, dan yang kedua adalah *rotor*, yaitu bagian mesin DC yang berputar. *Bagian stator* terdiri dari: *rangka motor, belitan stator, sikat arang, bearing dan terminal box*. Sedangkan *bagian rotor* terdiri dari: *komutator, belitan rotor, kipas rotor dan poros rotor*. Prinsip kerja generator DC sama dengan generator AC. Namun, pada generator DC arah arus induksinya tidak berubah. Hal ini disebabkan cincin yang digunakan pada generator DC berupa *cincin belah (komutator)*.



Gambar 2.14 Skema RL Circuit untuk Generator

Persamaan elektrik pada generator dengan menggunakan *Kirchhoff's voltage law*<sup>[7]</sup>:

$$(R_e + R_i)I + L \frac{dI}{dt} = V_e \quad (2.3)$$

dengan,

$$V_e = 2NBl a \dot{\theta} = k_v \quad (2.4)$$

karena induktansi diabaikan, maka persamaan tersebut menjadi:

$$(R_e + R_i)I + L \frac{dI}{dt} = V_e$$

sehingga persamaan menjadi:

$$(R_e + R_i)I = k_v \omega$$

$$I = \frac{k_v}{R_{tot}} \omega \quad (2.5)$$

dimana  $V_e$  = *electromotive voltage* (Volt)  
 $L$  = induktansi internal (Henries)  
 $I$  = arus (Ampere)  
 $k_v$  = *voltage coefficient* (V.s/rad)

Rumus torsi elektrik pada generator:

$$T_e = F_e a$$

$$T_e = NBl a I = k_t I \quad (2.6)$$

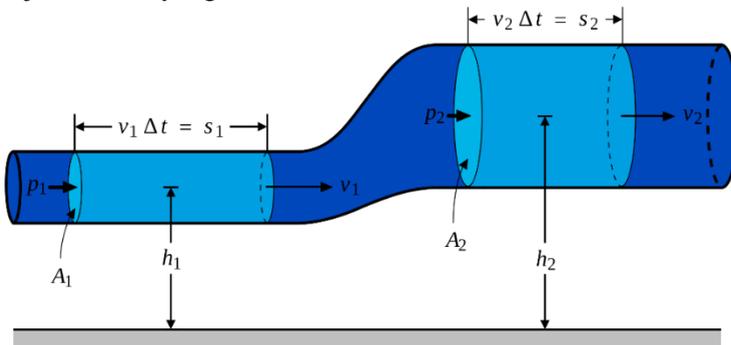
dimana  $T_e$  = torsi elektrik (N.m)  
 $N$  = jumlah lilitan  
 $B$  = induksi magnetik (Tesla)  
 $l$  = panjang kumparan (m)  
 $a$  = jarak kepada kawat (m)  
 $k_t$  = koefisien torsi elektrik (N.m/Ampere)

## 2.5 Teori Mekanisme Hidrolik dan Mekanika Fluida

### 2.5.1 Persamaan Bernoulli

Hukum Bernoulli adalah suatu hukum yang digunakan atau diterapkan secara luas dalam ilmu mekanika fluida. Digunakan secara luas karena memiliki persamaan yang sederhana, tetapi mencakup berbagai macam variabel, seperti

tekanan, kecepatan, dan gaya dalam fluida. Fluida memiliki sifat dapat mengalir pada tekanan tinggi ke tekanan yang rendah maupun dari titik yang tinggi ke titik yang rendah. Perbedaan tekanan dan perbedaan ketinggian mempengaruhi cepat aliran fluida. Kemudian Daniel Bernoulli mengamati fenomena tersebut. Dari menurunkan persamaan hukum Termodinamika 1 dan hukum Euler maka didapatkan hukum 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<sup>[8]</sup>.



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*):

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 \quad (2.7)$$

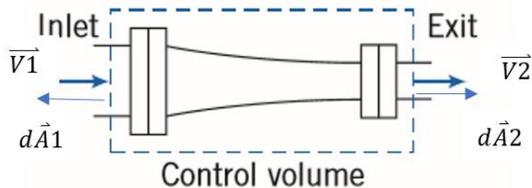
Dimana:

$p_1$  = tekanan fluida pada kondisi 1 ( $\text{N/m}^2$ )

- $p_2$  = tekanan fluida pada kondisi 2 ( $\text{N/m}^2$ )  
 $v_1$  = kecepatan aliran fluida pada kondisi 1 ( $\text{m/s}$ )  
 $v_2$  = kecepatan aliran fluida pada kondisi 2 ( $\text{m/s}$ )  
 $h_1$  = tinggi pipa kondisi 1 ( $\text{m}$ )  
 $h_2$  = tinggi pipa kondisi 2 ( $\text{m}$ )  
 $g$  = gravitasi bumi ( $9.8 \text{ m/s}^2$ )

### 2.5.2 Hukum Konservasi Massa

Hukum konservasi massa<sup>[8]</sup> adalah suatu hukum yang menyatakan bahwa massa yang berada di dalam suatu sistem yang tertutup akan tetap memiliki massa yang tidak berubah walaupun telah terjadi berbagai reaksi kimia ataupun perlakuan lain. Hukum ini sekaligus membuktikan bahwa energi tidak dapat dimusnahkan, tetapi hanya berubah bentuk. Ilustrasi hukum konservasi massa dapat dilihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Ilustrasi Hukum Kekekalan Massa pada Sambungan Pipa<sup>[8]</sup>

$$\left. \frac{dM}{dt} \right)_{system} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.9)$$

Perlu diperhatikan bahwa produk skalar  $\vec{V} \cdot d\vec{A} = \vec{V} \cdot d\vec{A} \cos \alpha$  dapat bernilai positif ketika  $\alpha < \pi/2$ , bernilai negatif jika  $\alpha > \pi/2$ , dan bahkan bernilai 0 jika  $\alpha = \pi/2$ . Karena

diasumsikan aliran inkompresibel, sehingga  $\rho = \text{konstan}$ , dan aliran *steady*, sehingga  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ .

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

$$\int_{CS} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.10)$$

dimana  $\rho$  = massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $V$  = volume fluida ( $\text{m}^3$ )  
 $\vec{V}$  = kecepatan ( $\text{m/s}$ )  
 $A$  = luas area ( $\text{m}^2$ )

### 2.5.3 Head Loss

*Head Loss*<sup>[8]</sup> merupakan *losses* yang terjadi pada fluida akibat adanya energi yang terbuang yang bisa disebabkan oleh kekasaran permukaan, tumbuhan di dasar saluran, ketidakteraturan bentuk saluran, kelurusan saluran, pengendapan dan pengikisan, ukuran dan bentuk saluran, tinggi permukaan air dan debitnya, perubahan - perubahan musiman serta bahan endapan yang dibawa oleh arus.

*Major head loss* merupakan kerugian energi dikarenakan efek gesekan pada *fully developed flow* di dalam pipa. Persamaan untuk *major head loss* adalah:

$$h_l = \left(\frac{64}{Re}\right) \frac{L}{2d_{tube}} \dot{x}^2 \quad (2.11)$$

$$\text{dengan } Re = \frac{d_{tube}}{\nu} \dot{x} \quad (2.12)$$

Substitusi persamaan (2.12) ke persamaan (2.11)

$$h_l = \left( \frac{64\nu}{d_{tube}\dot{x}} \right) \frac{L}{2d_{tube}} \dot{x}^2$$

Sehingga rumus *major head loss* menjadi:

$$h_l = \frac{32L\nu}{d_{tube}^2} \dot{x} \quad (2.13)$$

dimana

$h_l$	=	<i>major head loss</i> (m)
$L$	=	panjang pipa (m)
$d_{tube}$	=	diameter pipa (m)
$\dot{x}$	=	kecepatan aliran (m/s)
$Re$	=	<i>reynold number</i>
$\nu$	=	viskositas kinematik fluida (m <sup>2</sup> /s)

Nilai *friction factor* dipengaruhi oleh nilai Reynold Number ( $Re$ ) seperti dijelaskan pada persamaan (2.12) dan kekasaran permukaan pipa. Dari nilai  $Re$  dapat ditentukan jenis aliran dari fluida. Apabila  $Re < 2300$  aliran digolongkan sebagai aliran laminar, sedangkan apabila  $Re > 2300$  maka aliran digolongkan sebagai aliran turbulen.

*Minor head loss* merupakan *losses* yang terjadi karena fluida melewati bagian-bagian dari sistem perpipaan seperti *elbow*, *sudden contraction*, *sudden enlargement*, *orifice*, *valve*, dan komponen-komponen perpipaan lainnya. Persamaan untuk *minor head loss* adalah sebagai berikut:

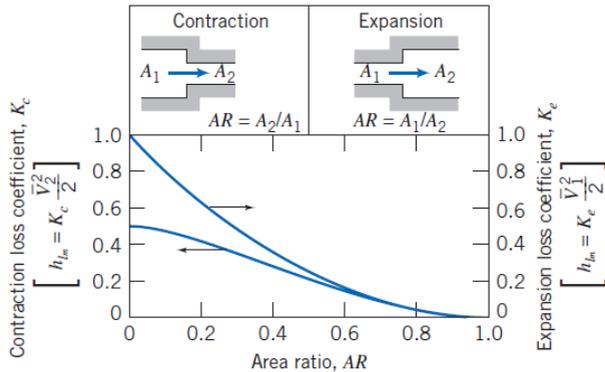
$$h_{lm} = K \frac{\dot{x}^2}{2} \quad (2.14)$$

dimana

$h_{lm}$	=	<i>minor head loss</i>
$K$	=	<i>loss coefficient</i>

*Losses* pada *sudden enlargements* dan *contractions* terjadi karena adanya perubahan area penampang (membesar ataupun

mengecil) secara tiba – tiba. Untuk mengetahui besarnya koefisien *headloss* minor, dapat dilihat pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 *Loss coefficient* untuk Aliran Melalui Perubahan *Sudden Area Change*<sup>[8]</sup>

*Losses* yang diakibatkan oleh perubahan luas penampang, dapat diantisipasi dengan cara memasang *nozzle* maupun *difusser* di antara dua bagian dari pipa lurus yang terjadi perubahan luas penampang.

### Persamaan Energi Akibat *Head Loss*

Dengan adanya kerugian energi yang diakibatkan oleh *head loss*, maka jumlah energi yang dihasilkan setelah melewati titik *head loss* akan mengalami pengurangan jumlah. Dengan memanfaatkan persamaan Bernoulli, berikut adalah perumusan persamaan energi yang diakibatkan oleh adanya *head loss*.

$$\left( \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 \right) - \left( \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 \right) = h_{IT} \quad (2.15)$$

dimana  $h_{IT}$  = *head loss* total

Selisih energi pada kedua titik pada suatu aliran fluida tertutup merupakan jumlah energi yang hilang yang diakibatkan oleh adanya *head loss* pada baik *head loss major* maupun *head loss minor*.

#### 2.5.4 T-Junction

Dikutip dari tinjauan pustaka penelitian Merlino<sup>[5]</sup>, *T-junction* merupakan sambungan yang menghubungkan 3 buah pipa, dimana dua cabang aliran yang mendekati (*approach*) tegak lurus terhadap cabang aliran *downstream* (*combining flow*), atau dua cabang *downstream* yang tegak lurus terhadap cabang aliran yang mendekati (*dividing flow*). Perumusan dibawah ini diturunkan dengan menganggap  $\delta_z = \delta_0$  untuk *combining flow* dan  $\delta_a = \delta_d$  untuk *dividing flow*. Ketiga cabang memiliki luas penampang yang sama besar.

Dalam kasus *combining flow*, *coefficient of losses* didefinisikan dalam fungsi kecepatan *head* dari cabang aliran *downstream* dengan persamaan sebagai berikut:

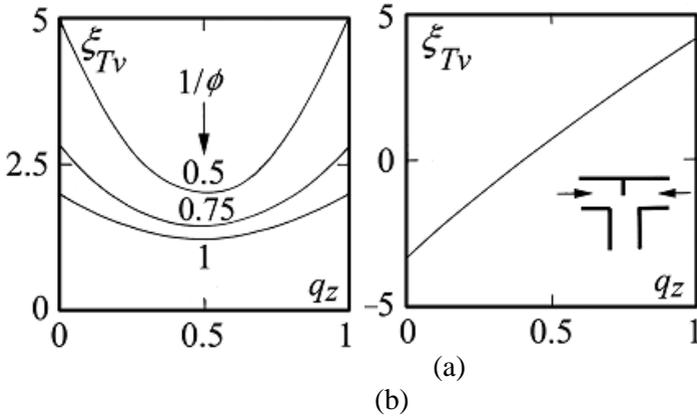
$$\xi_{tv} = \frac{\Delta H_{Tv}}{\left(\frac{V^2}{2g}\right)} \quad (2.16)$$

dimana :  $\Delta H_{Tv}$  = selisih *head* antara *approach flow* dan *downstream flow* (m/s<sup>2</sup>)

$V$  = kecepatan *head* (m/s<sup>2</sup>)

$\xi_{tv}$  = *coefficient of losses*

Berdasarkan hasil eksperimen, nilai *coefficient of losses* pada kasus *combining flow* dalam fungsi debit aliran ditunjukkan pada gambar 2.18<sup>[5]</sup>.



Gambar 2.18 *Coefficient of Losses* Untuk Kasus *Combining Flow* pada *T-junction* (a) Tanpa Dinding Pemisah (b) dengan Dinding Pemisah

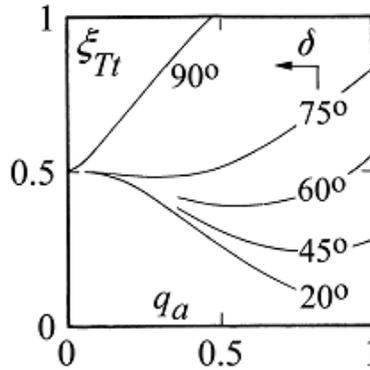
Sumbu horizontal pada grafik merupakan *discharge ratio* ( $q_z$ ) yang dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$q_z = \frac{Q_z}{Q_u} \quad (2.17)$$

dimana  $Q_z$  = Debit aliran *approach branches* ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_u$  = Debit aliran *downstream branches* ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

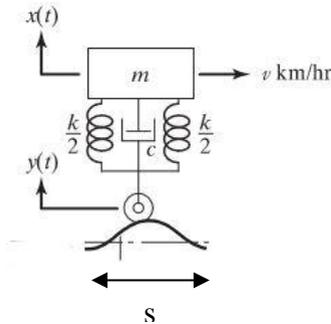
Sementara pada kasus *dividing flow*, *coefficient of losses* ditunjukkan pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Coefficient of Losses pada Dividing Flow<sup>[5]</sup>

### 2.6 Relative Motion of Base

Ketika suatu kendaraan melewati *bump*, sistem suspensi kendaraan tersebut bergerak dengan kecepatan yang berbeda-beda relatif terhadap satu sama lain. Persamaan gerak dari sistem yang bergerak relatif ditunjukkan pada persamaan 2.18<sup>[13]</sup>.



Gambar 2.20 Seperempat Kendaraan yang Melewati Jalanan Kasar

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{y} + ky \quad (2.18)$$

Dengan:

$$y = y_0 \sin\left(\frac{\pi}{t_0}\right)t$$

$$\dot{y} = \frac{\pi}{t_0} y_0 \cos\left(\frac{\pi}{t_0}\right)t$$

Dengan  $t_0 = \frac{s}{v}$ , dimana  $s$  adalah panjang bump dan  $v$  adalah kecepatan kendaraan.

$y$  dan  $\dot{y}$  dimasukkan ke dalam persamaan 2.18, sehingga didapatkan:

$$\dot{x} = \left(\frac{\pi}{t_0} y_0 \cos\left(\frac{\pi v}{s}\right)t\right) + \frac{k}{c} y_0 \sin\left(\frac{\pi v}{s}\right)t - \frac{k}{c} x - \frac{m}{c} \ddot{x} \quad (2.19)$$

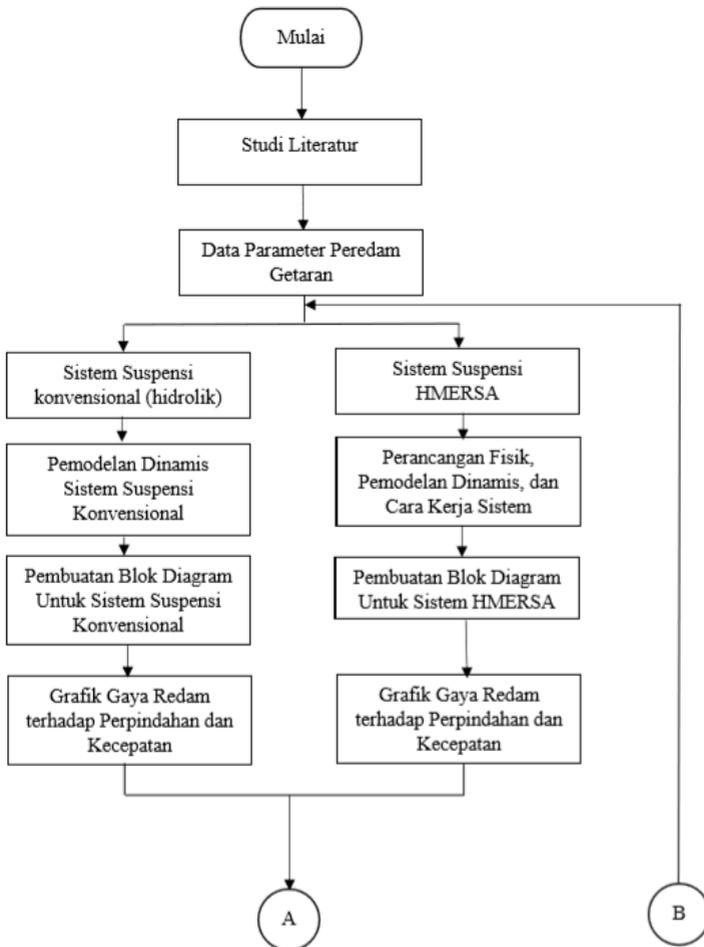
Dengan  $\dot{r}$  adalah kecepatan relatif antara kendaraan dengan *base* (kecepatan gerak *shock absorber*), maka:

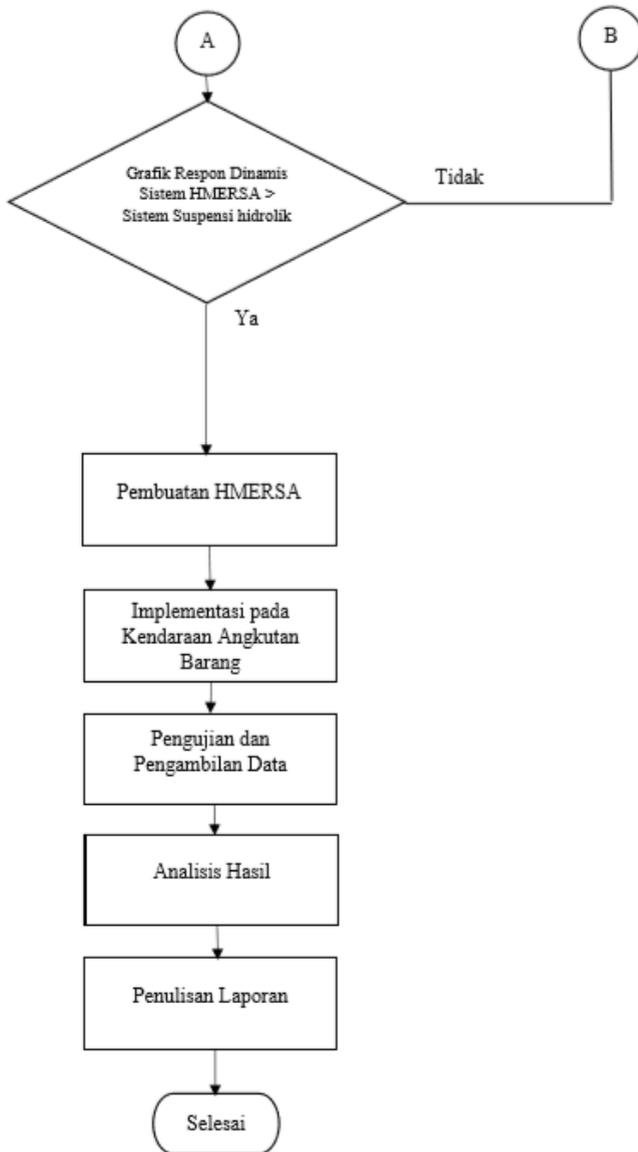
$$\dot{r} = \dot{x} - \dot{y} \quad (2.20)$$

# BAB III METODOLOGI

## 3.1 Metodologi Penelitian

Dalam proses analisis, dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan pada diagram alir pada gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

Alur pengerjaan tugas akhir ini secara umum dapat dilihat pada gambar 3.1. Pengerjaan tugas akhir dimulai dengan studi literatur, yaitu dengan mencari sumber referensi penelitian-penelitian yang berhubungan dengan topik tugas akhir, dan melakukan pembelajaran dengan menggunakan *software* seperti MATLAB dan lainnya. Tahap selanjutnya yaitu menentukan parameter peredam getaran yang akan digunakan untuk tugas akhir. Data-data parameter tersebut bisa digunakan untuk tahap selanjutnya yaitu melakukan pemodelan dinamis sistem suspensi konvensional dan HMERSA. Kemudian dari pemodelan dinamis sistem suspensi, dilakukan penyusunan blok diagram pada *software* MATLAB dengan memasukkan data-data parameter yang sudah ditentukan. Blok diagram yang sudah selesai dibuat, kemudian di jalankan dan akan menampilkan grafik gaya redam terhadap perpindahan dan grafik gaya redam terhadap kecepatan. Setelah grafik yang disimulasikan di MATLAB sudah dianggap sesuai, maka dilakukan perancangan geometri dan dimensi HMERSA yang akan digunakan untuk tugas akhir. Dengan data tersebut, HMERSA dibuat dan diuji coba pada kendaraan angkutan barang. Uji coba tersebut dilakukan dengan bantuan berbagai peralatan pemantau sistem HMERSA. Data yang didapatkan di analisis, kemudian tahap terakhir adalah penyusunan laporan tugas akhir.

### **3.2 Tahapan Studi Literatur**

Studi literatur ini dilakukan untuk menunjang pengetahuan mahasiswa, menambah wawasan, pengetahuan, dan landasan mengenai permasalahan yang akan dibahas dalam topik tugas akhir. Materi-materi yang mendukung penulisan tugas akhir ini meliputi bidang mekanika getaran, getaran sistem mekanis, pemodelan sistem dinamis, teknik kendali otomotif, *shock absorber* dan HMERSA. Studi tersebut dilakukan dengan mencari sumber-sumber referensi dari publikasi jurnal ilmiah dan penelitian-penelitian terdahulu. Penelitian terdahulu yang dijadikan referensi adalah penelitian yang berhubungan dengan

HMERSA. Sistem HMERSA pada penelitian terdahulu ditunjukkan pada gambar 3.2. Studi literatur juga meliputi pembelajaran *software* MATLAB Simulink yang akan digunakan untuk pembuatan blok diagram dan parameter-parameter penelitian, sehingga dapat menghasilkan data yang diinginkan.



Gambar 3.2 Sistem HMERSA Hasil Pengembangan Penelitian Terdahulu

Selain studi literatur, juga dilakukan studi lapangan, yaitu studi untuk menentukan parameter-parameter alat yang akan diuji, seperti dimensi dan massa sistem seperempat kendaraan, komponen hidrolik berupa silinder hidrolik, pipa, akumulator hidrolik, motor hidrolik, dan generator elektromagnetik. Studi lapangan ini dilakukan dengan melakukan peninjauan katalog penjualan peralatan suspensi, dan berdasarkan parameter penelitian terdahulu.

### 3.3 Data Parameter Peredam Getaran

Pada tugas akhir ini, digunakan jenis *shock absorber* yang sama antara pengujian *shock absorber* konvensional dengan sistem HMERSA. Jenis *shock absorber* yang sama tersebut ditujukan untuk dapat mengetahui perbedaan antara suatu sistem peredam getaran dengan dan tanpa HMERSA. Data parameter *shock absorber* ini didapatkan dari referensi penelitian-penelitian sebelumnya. Data parameter *shock absorber* yang digunakan untuk tugas akhir dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Parameter Sistem Suspensi Konvensional dan HMERSA

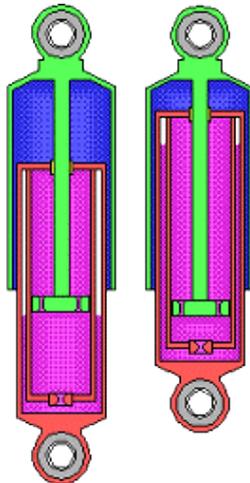
Parameter	Nilai
<b>Silinder Hidrolik dan Pipa</b>	
Diameter <i>rod</i> piston (d)	18 mm
Diameter <i>bore</i> Piston (D)	32 mm
Diameter pipa ( $d_{\text{tube}}$ )	1/4 in
Diameter <i>check valve</i>	3/8 in
Massa jenis fluida ( $\rho$ )	860 kg/m <sup>3</sup>
Viskositas kinematik fluida ( $\nu$ ) (ISO VG 10)	10 mm <sup>2</sup> /s
Panjang pipa (L)	0.74 m
<b>Motor Hidrolik dan Generator</b>	
Efisiensi volumetric motor hidrolik ( $\eta_v$ )	0.964
Efisiensi mekanik motor hidrolik ( $\eta_m$ )	0.9
<i>Range</i> tekanan hidrolik	0.08 - 0.45 MPa
<i>Range</i> temperatur kerja	5°-85°C
Tegangan bangkitan maksimum (V)	15 V
Arus listrik bangkitan maksimum (A)	260 MA

### 3.4 Pemodelan Fisik dan Dinamis Sistem Peredam Getaran

#### 3.4.1 Pemodelan Fisik Sistem Peredam Getaran Konvensional

Dalam tugas akhir ini akan dianalisis karakteristik gaya redaman dan energi bangkitan dari sistem HMERSA. Pemodelan fisik sistem peredam getaran dapat dilihat pada gambar 3.3.

Model fisik *shock absorber* meliputi piston, *orifice*, *valve*, dan fluida kerja oli suspensi. Gambar 3.3 memperlihatkan model fisik *shock absorber* pada kondisi kompresi dan ekspansi. Kondisi kompresi seperti terlihat pada gambar 3.3 sebelah kanan, oli suspensi ditekan oleh piston dengan *orifice* setelah mendapatkan gaya dari luar, sehingga mendorong oli ke rongga-rongga di samping, sehingga memberikan gaya redam kepada kendaraan. Sedangkan pada gambar 3.3 sebelah kiri, kondisi ekspansi terjadi ketika terjadi gaya tarik pada piston, sehingga fluida yang sudah masuk ke dalam rongga-rongga tertarik kembali.

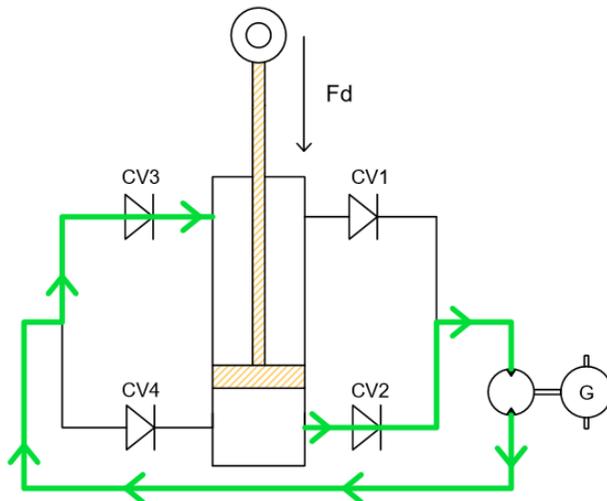


Gambar 3.3 Model Fisik *Shock absorber* Konvensional

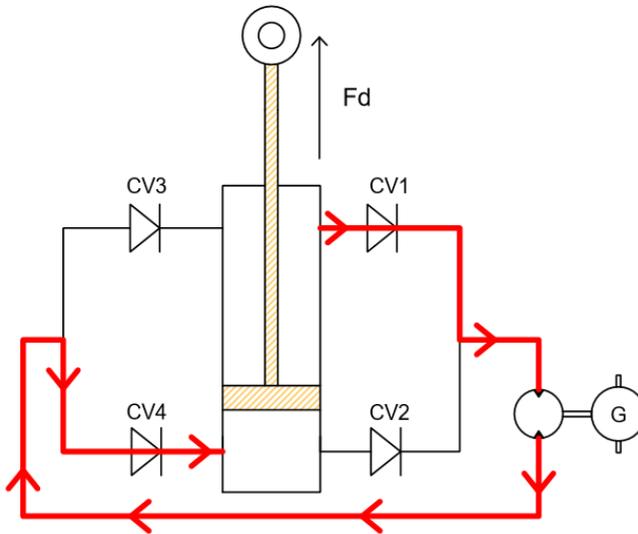
### 3.4.2 Perancangan Fisik dan Cara Kerja Sistem HMERSA

Sistem *hydro-magneto-electric regenerative shock absorber* (HMERSA) merupakan sistem hidrolik yang memanfaatkan aliran fluida oli suspensi untuk menghasilkan energi, sehingga meminimalisir terbuangnya energi. Pemodelan fisik sistem HMERSA pada tugas akhir ini dapat dilihat pada gambar 3.4.

Sistem HMERSA pada tugas akhir ini menggunakan *hydroelectric power generator*, yaitu generator yang memiliki motor hidrolik yang menyatu. Penggunaan *hydroelectric power generator* ditujukan untuk mengurangi *losses* yang terjadi akibat gesekan roda gigi seperti yang terjadi pada tugas akhir sebelumnya. *Shock absorber* yang digunakan adalah untuk kendaraan angkutan barang. *Shock absorber* tersebut dilubangi dan dihubungkan dengan pipa dan *check valve*. Pipa tersebut dihubungkan dengan *hydroelectric power generator*.



Gambar 3.4 Skema Kerja Sistem HMERSA dengan *Hydroelectric Power Generator* pada Kondisi Kompresi



Gambar 3.5 Skema Kerja Sistem HMERSA dengan *Hydroelectric Power Generator* pada Kondisi Ekspansi

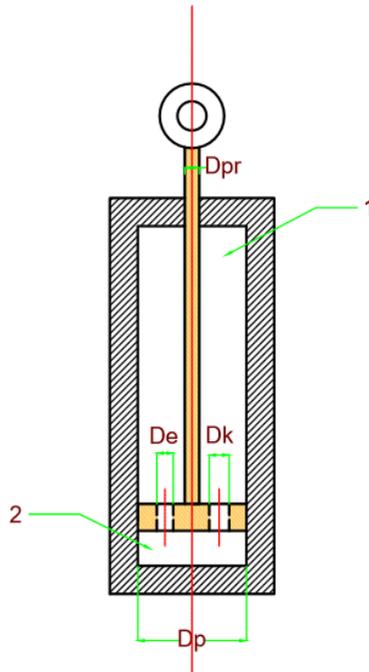
Kondisi kerja sistem HMERSA terdiri dari dua, yaitu kondisi kompresi dan ekspansi. Pada gambar 3.4 dapat dilihat cara kerja sistem HMERSA pada saat kondisi kompresi. Saat kendaraan melewati *bump*, gaya  $F_d$  mendorong piston ke bawah sehingga oli suspensi tertekan dan melewati *check valve* 2 yang terbuka, sedangkan *check valve* 4 tertutup. *Check valve* 4 ditutup agar oli suspensi hanya mengalir satu arah. Oli suspensi kemudian melewati *T-junction* dan tertekan menuju *hydroelectric power generator* sehingga motor hidrolis berputar dan generator menghasilkan energi listrik. Kemudian oli suspensi tertekan melewati pipa dan kembali ke tabung suspensi melalui *check valve* 3 yang terbuka. Oli suspensi mengisi rongga suspensi di bagian atas saat keadaan kompresi berlangsung. Aliran oli suspensi pada sistem HMERSA pada kondisi kompresi diilustrasikan dengan garis hijau.

Pada kondisi ekspansi, yaitu ketika piston bergerak ke atas, oli suspensi akan tertekan ke atas sehingga melewati *check valve* 1 menuju pipa, sedangkan *check valve* 3 tertutup untuk mencegah oli suspensi mengalir ke arah yang berlawanan. Kemudian oli suspensi melewati T-junction dan memutar *hydroelectric power generator* sehingga menghasilkan energi listrik. Setelah itu, oli suspensi tertekan melalui pipa, melalui T-junction dan masuk ke tabung suspensi melalui *check valve* 4. Skema kerja sistem HMERSA pada kondisi ekspansi dapat dilihat pada gambar 3.5, dengan aliran oli suspensi diilustrasikan dengan garis merah.

### **3.4.3 Pemodelan Dinamis Sistem Peredam Getaran Konvensional**

Sistem peredam getaran konvensional yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis *shock absorber* hidrolis untuk kendaraan angkut jenis Daihatsu Gran Max. Di dalam *shock absorber* tersebut terdapat parameter-parameter yang digunakan untuk perhitungan model dinamis, sehingga dapat diketahui respon dinamis untuk seperempat kendaraan dalam bentuk grafik gaya redam terhadap perpindahan dan kecepatan. Model dinamis *shock absorber* dapat dilihat pada gambar 3.5.

Model dinamis *shock absorber* pada gambar 3.6 mewakili kondisi peredam getaran pada saat kompresi. Di dalam peredam getaran tersebut terdapat komponen-komponen seperti *piston rod*, *orifice*, silinder, dan fluida kerja oli suspensi. Pada saat keadaan kompresi, De akan tertutup oleh *check valve*, sehingga fluida akan melewati Dk, dan sebaliknya untuk kondisi ekspansi, Dk akan tertutup sehingga fluida akan melewati De.



Gambar 3.6 Model Dinamis *Shock Absorber* Konvensional

dimana:

$D_{pr}$	=	diameter piston rod
$D_k$	=	diameter kompresi
$D_e$	=	diameter ekspansi
$D_p$	=	diameter piston

Apabila ditinjau dari persamaan energi yaitu sebagai berikut:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + hl$$

Dengan asumsi  $h_1 = h_2$  maka:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + hl$$

$$p_2 - p_1 = \frac{\rho}{2}(v_2^2 - v_1^2) + \rho hl$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2}(v_2^2 - v_1^2) + \rho hl \quad (3.1)$$

dimana 1: saat kondisi awal dan 2: saat kondisi akhir.

Persamaan 3.2 menunjukkan hubungan *shock absorber* dengan *orifice* pada kondisi kompresi dan ekspansi menggunakan hukum konservasi massa. Pada saat kondisi ekspansi:

$$Q_1 = Q_{ekspansi}$$

$$v_1 A_1 = v_e A_e$$

$$v_e = \frac{A_1}{A_e} \times v_1 \quad (3.2)$$

Kemudian dilakukan substitusi persamaan (3.1) ke persamaan (3.2) dengan catatan kondisi 2 pada *orifice* ekspansi dan kondisi 1 pada silinder hidrolik sehingga persamaan menjadi:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2}(v_e^2 - v_1^2) + \rho hl$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left( \left( \frac{A_1}{A_e} v_1 \right)^2 - v_1^2 \right) + \rho h l$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} v_1^2 \left( \left( \frac{A_1}{A_e} \right)^2 - 1 \right) + \rho h l \quad (3.3)$$

Persamaan gaya redaman dari persamaan 3.3 disubstitusikan ke dalam persamaan 3.4.

$$F_d = \Delta p \times A_1$$

$$F_d = \frac{\rho}{2} A_1 v_1^2 \left( \left( \frac{A_1}{A_e} \right)^2 - 1 \right) + \rho A_1 h l \quad (3.4)$$

Sedangkan untuk kondisi kompresi:

$$Q_2 = Q_{kompresi}$$

$$v_2 A_2 = v_k A_k$$

$$v_k = \frac{A_2}{A_k} \times v_2 \quad (3.5)$$

Kemudian dilakukan substitusi persamaan (3.5) ke persamaan (3.1), sehingga:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} (v_k^2 - v_2^2) + \rho h l$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left( \left( \frac{A_2}{A_k} v_2 \right)^2 - v_2^2 \right) + \rho h l$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} v_2^2 \left( \left( \frac{A_2}{A_k} \right)^2 - 1 \right) + \rho h l \quad (3.6)$$

Persamaan gaya redaman dari persamaan 3.6 disubstitusikan ke dalam persamaan 3.7.

$$F_d = \Delta p \times A_2$$

$$F_d = \frac{\rho}{2} A_2 v_2^2 \left( \left( \frac{A_2}{A_k} \right)^2 - 1 \right) + \rho A_2 h l \quad (3.7)$$

dimana:

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

$$A_2 = \frac{\pi D^2}{4}$$

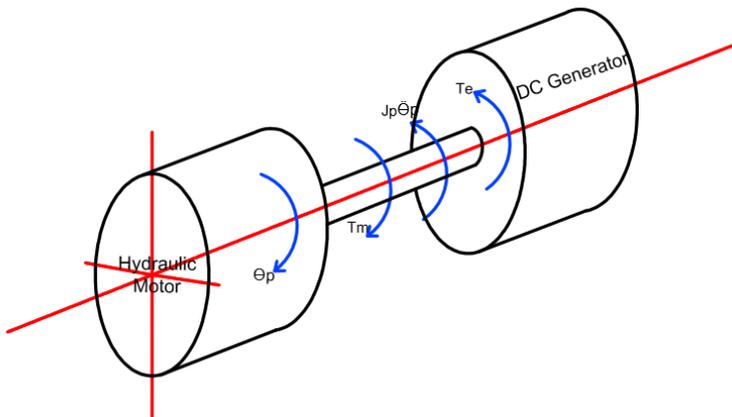
$$A_{e,k} = \frac{\pi d_{e,k}^2}{4}$$

Setelah didapatkan persamaan gaya redam untuk kondisi kompresi dan ekspansi, faktor-faktor lain yang memengaruhi gaya redam, seperti *head loss* dimasukkan ke dalam perhitungan. Persamaan *major head loss* (2.13) dan *minor head loss* (2.14) dimasukkan ke dalam persamaan gaya redam.

### 3.4.4 Pemodelan Dinamis Sistem HMERSA dengan *Hydroelectric Power Generator*

Sistem HMERSA menggunakan komponen-komponen yang lebih banyak dan rumit jika dibandingkan dengan *shock absorber* konvensional. Di dalam sistem HMERSA digunakan *check valve*, sistem perpipaan, *orifice*, dan *hydroelectric power generator*. Dengan penambahan *hydroelectric motor generator*, perlu dilakukan analisis mengenai pemodelan dinamis dan torsi elektrik pada alat tersebut.

Pemodelan dinamis sistem HMERSA yang akan dilakukan adalah pada sambungan poros antara motor hidrolis dengan generator. Untuk mengetahui perbedaan tekanan yang terjadi pada kedua sisi poros tersebut, dilakukan pemodelan dinamis seperti ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Model Dinamis Poros Sistem HMERSA

Pada gambar 3.7 dapat dilihat bahwa poros mengalami dua macam torsi, yaitu torsi motor dan torsi elektrik, sehingga persamaan gerak dari poros tersebut dapat dilihat pada persamaan 3.9. Dengan asumsi poros sangat *rigid*, dan inersia poros sangat kecil, maka  $T_m = T_e$  dan  $J_p = 0$ .

$$J_p \ddot{\theta}_p + T_e - T_m = 0$$

$$J_p \ddot{\theta}_p + T_e = T_m \quad (3.8)$$

$$\ddot{\theta}_p = \frac{1}{J_p} (T_m - T_e) \quad (3.9)$$

$$\ddot{\theta}_p = 0$$

Persamaan 2.2 kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan 3.8.

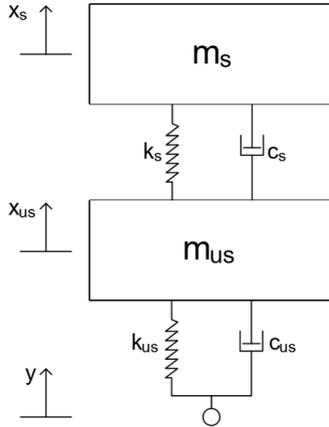
$$T_e = T_m$$

$$T_e = \Delta p_m q \eta_m$$

$$\Delta p_m = \frac{T_e}{q \eta_m} \quad (3.10)$$

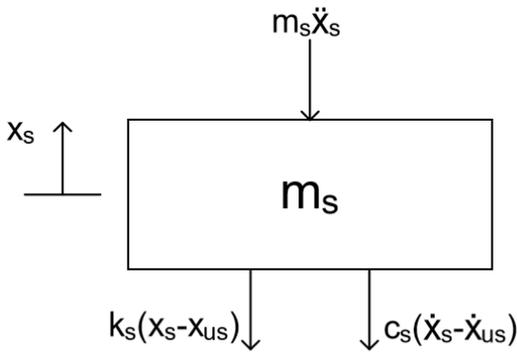
### 3.5 Persamaan Matematis Sistem HMERSA pada Seperempat Kendaraan

Pada persamaan matematis sistem HMERSA seperempat kendaraan, terdapat dua jenis massa, yaitu massa *sprung* dan massa *unsprung*. Massa *sprung* ( $m_s$ ) merupakan massa yang ditopang di atas suspensi, seperti massa *body*, *frame*, mesin, interior, dan lain-lain. Sedangkan massa *unsprung* ( $m_{us}$ ) adalah massa suspensi, roda, *bearing*, rem, dan lain-lain. *Free body diagram* (FBD) untuk sistem HMERSA pada seperempat kendaraan ditunjukkan pada gambar 3.8.  $C_s$  mewakili damping *coefficient* sistem HMERSA, yang didapatkan dari perhitungan gaya redam sistem HMERSA.  $K_s$  merupakan konstanta pegas, sedangkan  $K_{us}$  dan  $C_{us}$  merupakan nilai konstanta pegas dan koefisien redaman dari roda.



Gambar 3.8 *Free Body Diagram* Sistem HMERSA pada Seperempat Kendaraan

*Free body diagram* untuk massa *sprung*:



Gambar 3.9 *Free Body Diagram* Massa *Sprung* pada Seperempat Kendaraan

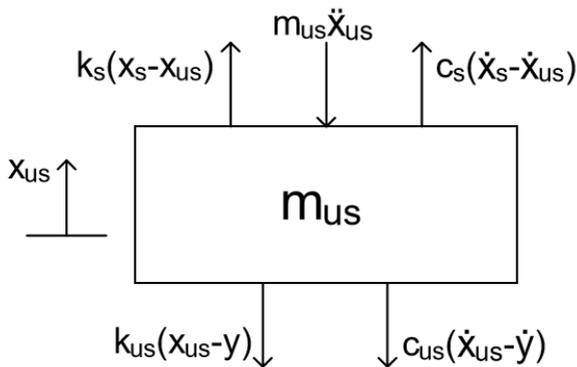
Sehingga persamaan gerak untuk massa *sprung* ditunjukkan pada persamaan 3.11.

$$m_s \ddot{x}_s + k_s(x_s - x_{us}) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_{us}) = 0$$

$$m_s \ddot{x}_s = -k_s(x_s - x_{us}) - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_{us})$$

$$\ddot{x}_s = \frac{1}{m_s} [-k_s(x_s - x_{us}) - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_{us})] \quad (3.11)$$

*Free body diagram* untuk massa *unsprung*:



Gambar 3.10 *Free Body Diagram* Massa *Unsprung* pada Seperempat Kendaraan

Sehingga persamaan gerak untuk massa *unsprung* ditunjukkan pada persamaan 3.12.

$$m_{us} \ddot{x}_{us} - k_s(x_s - x_{us}) - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_{us}) + k_{us}(x_{us} - y) + c_{us}(\dot{x}_{us} - \dot{y}) = 0$$

$$m_{us} \ddot{x}_{us} = k_s(x_s - x_{us}) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_{us}) - k_{us}(x_{us} - y) - c_{us}(\dot{x}_{us} - \dot{y})$$

$$\ddot{x}_{us} = \frac{1}{m_{us}} [k_s(x_s - x_{us}) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_{us}) - k_{us}(x_{us} - y) - c_{us}(\dot{x}_{us} - \dot{y})] \quad (3.12)$$

### 3.6 Pembuatan Blok Diagram dan Analisis Grafik

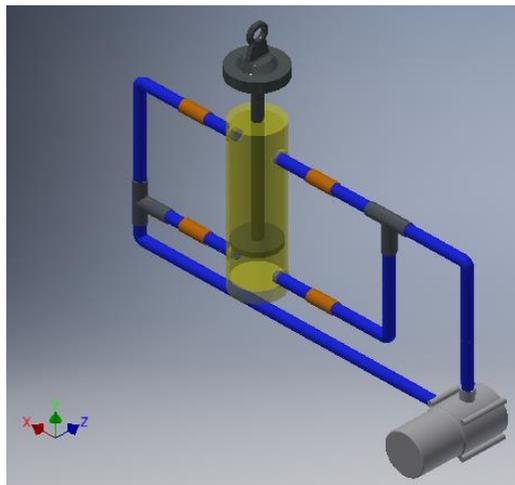
Pembuatan blok diagram bertujuan untuk mengetahui respon dinamis dari *shock absorber*. Pemodelan dilakukan pada *software* MATLAB Simulink dengan memasukkan parameter-parameter yang telah ditentukan sebelumnya ke dalam *M-file*. Langkah-langkah pengerjaan simulasi dengan MATLAB Simulink yaitu dengan membuat blok diagram dari persamaan matematis yang telah dibuat. Blok diagram yang sudah terhubung dengan benar kemudian dimasukkan parameter-parameter berupa angka ke dalam *M-file*. Setelah parameter yang dimasukkan ke dalam *M-file* sesuai dengan parameter pada blok diagram, maka simulasi di jalankan, sehingga akan memunculkan grafik gaya redam terhadap perpindahan dan kecepatan. Dalam simulasi ini digunakan input sinusoidal.

Grafik yang didapatkan dari simulasi blok diagram adalah karakteristik gaya redam untuk *shock absorber* tersebut. Karakteristik gaya redam merupakan informasi yang penting untuk digunakan ke depannya, seperti untuk menganalisis kenyamanan, kelayakan untuk pengangkutan barang dan lain-lain.

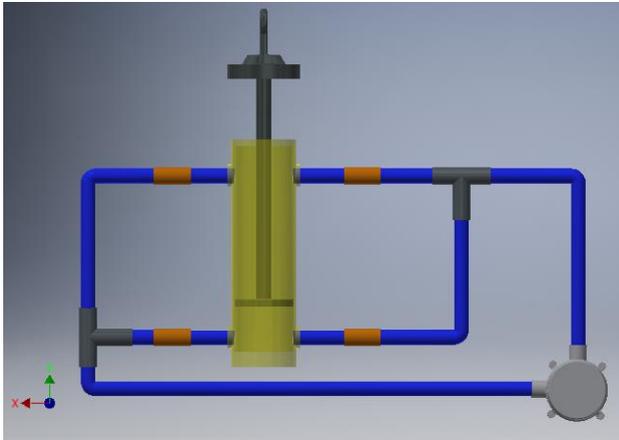
### 3.7 Pembuatan Sistem HMERSA

Setelah menentukan parameter-parameter yang akan digunakan pada sistem HMERSA dan simulasi pada MATLAB Simulink telah selesai dilakukan, maka sistem HMERSA pun dibuat. Pembuatan sistem HMERSA menggunakan komponen-komponen seperti *shock absorber*, *check valve*, sistem perpipaan, *hydroelectric power generator*, dan komponen sambungan lainnya. Beberapa komponen dimodifikasi agar sesuai dengan skema HMERSA yang telah di desain, seperti *shock absorber*

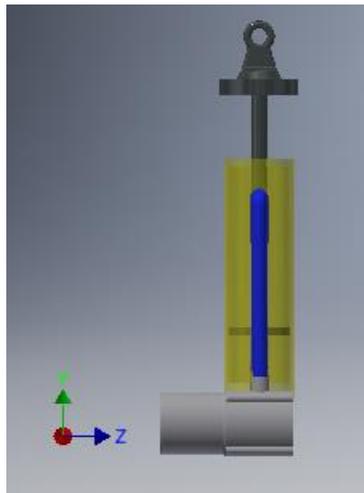
konvensional yang memiliki sistem tertutup. *Shock absorber* tersebut dilubangi dengan menggunakan bor dan dilakukan pemasangan sambungan ulir sehingga bias disambungkan dengan pipa hidrolik. Pembuatan alat HMERSA dilakukan di bengkel dengan peralatan yang memadai, seperti mesin bor, mesin las, dan lain-lain. Desain 3 dimensi sistem HMERSA ditunjukkan pada gambar 3.11 dan 3.12.



Gambar 3.11 Desain Konstruksi HMERSA dengan *Hydroelectric Power Generator*



(a)



(b)

Gambar 3.12 Konstruksi HMERSA Tampak Depan (a) dan Tampak Samping (b)

### 3.8 Implementasi dan Pengujian pada Kendaraan

Setelah konstruksi HMERSA selesai dibuat, maka akan dilakukan pengujian pada kendaraan angkutan barang untuk mengetahui bagaimana sistem HMERSA berjalan secara eksperimen. Jenis kendaraan angkutan barang yang akan digunakan adalah dengan Daihatsu Gran Max. Jenis mobil tersebut dipilih karena memiliki ruang bawah mobil yang lega, sehingga akan mempermudah pemasangan sistem HMERSA. Keuntungan lain dengan ruang bawah mobil yang lega adalah perbedaan ketinggian antara *shock absorber* dengan *hydroelectric power generator* yang besar, sehingga oli suspensi akan lebih mudah mengalir dengan bantuan gaya gravitasi. Sistem HMERSA akan dipasang pada roda belakang di sebelah kanan.

Pengujian pada kendaraan dilakukan dengan beberapa alat bantu seperti *oscilloscope* untuk mengetahui besarnya energi bangkitan yang dihasilkan oleh generator dan alat-alat penunjang lainnya seperti sumber daya listrik untuk peralatan uji (akumulator), *converter* arus DC ke AC untuk memberikan daya pada *oscilloscope*, dan kamera untuk dokumentasi pengujian. Pengujian dilakukan dengan variasi kecepatan kendaraan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam untuk mengetahui karakteristik gaya redam pada masing-masing kecepatan tersebut.

### 3.9 Analisis Hasil Pengujian

Pengujian sistem HMERSA yang dilakukan pada kendaraan angkutan barang dengan bantuan *oscilloscope* akan menampilkan data berupa grafik. Untuk respon percepatan, perlu dilakukan konversi dari data *oscilloscope* yang masih berupa voltase. Persamaan untuk mengubah voltase menjadi respon percepatan ditunjukkan pada persamaan 3.13. Setelah dilakukan konversi, data tersebut di filter dalam *software* MATLAB. Untuk tegangan bangkitan oleh HMERSA, data dari *oscilloscope* bisa langsung dilakukan filter pada *software* MATLAB.

$$Response = \frac{G}{V} \cdot g \cdot \frac{f}{100} \quad (3.13)$$

dimana:  $G$  = Data yang akan diolah (V)  
 $V$  = Sensitivitas accelerometer (0.05 Volt)  
 $g$  = Percepatan gravitasi ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )  
 $f$  = Frekuensi eksitasi yang diberikan (Hz)  
100 = Frekuensi kerja accelerometer pada saat  
100 MHz

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Hasil Simulasi pada *Software* MATLAB Simulink**

Pada tugas akhir ini, diperlukan beberapa data yang dapat digunakan untuk menunjang hasil eksperimen. Salah satu cara untuk mendapatkan data tersebut adalah melalui simulasi pada *software* untuk mendapatkan grafik gaya redam suspensi terhadap perpindahan, kecepatan, dan juga tegangan bangkitan dari sistem HMERSA terhadap waktu. *Software* yang digunakan untuk melakukan simulasi adalah MATLAB Simulink. *Software* tersebut digunakan karena dapat melakukan simulasi seperempat kendaraan dengan menggunakan blok diagram yang saling disambungkan. Ketika blok diagram sudah disambungkan dan parameter-parameter seperempat kendaraan dan sistem HMERSA sudah ditentukan pada *M-File*, maka simulasi dapat menampilkan hasil berupa grafik.

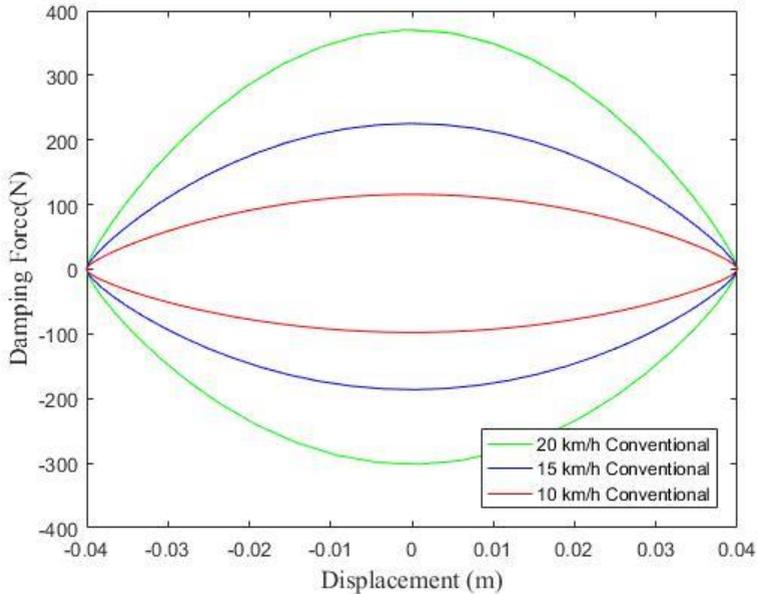
##### **4.1.1 Parameter Simulasi**

Simulasi yang dilakukan mengacu pada data sistem HMERSA yang telah ditentukan sebelumnya. Data parameter sistem HMERSA yang dimasukkan ke dalam *M-File* ditunjukkan pada tabel 3.1 pada halaman 21.

##### **4.1.2 Hasil Simulasi *Shock Absorber* Konvensional dengan Variasi *Input* Frekuensi**

Simulasi pertama yang dilakukan adalah simulasi *shock absorber* konvensional pada seperempat kendaraan. Terdapat tiga variasi *input* frekuensi yang digunakan, yaitu sebesar 0.278 Hz atau dengan kecepatan kendaraan 10 km/jam, 0.417 Hz atau dengan kecepatan kendaraan 15 km/jam, dan 0.556 Hz atau dengan kecepatan kendaraan 20 km/jam. Setelah *M-File* dan blok diagram selesai disusun dan di jalankan tanpa adanya *error*, maka grafik

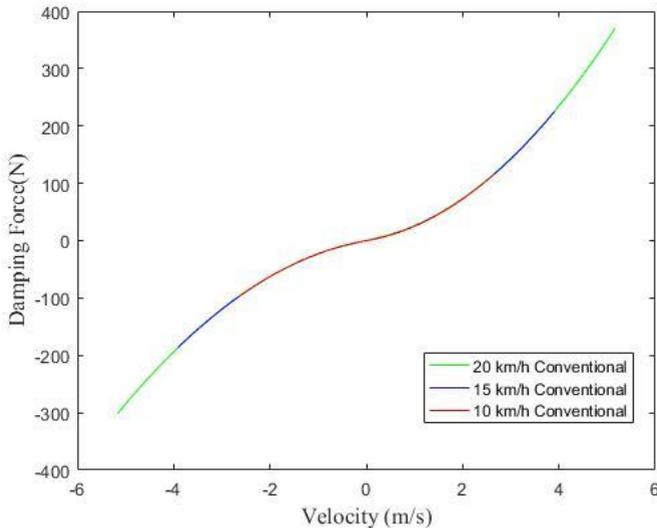
yang sudah di plot akan muncul. Hasil dari simulasi *shock absorber* konvensional ini adalah didapatkan 2 jenis grafik, yaitu grafik gaya redam terhadap perpindahan dan grafik gaya redam terhadap kecepatan. Kedua grafik tersebut ditunjukkan pada gambar 4.1 dan 4.2.



Gambar 4.1 Grafik Gaya Redam Terhadap Perpindahan *Shock Absorber* Konvensional

Pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa gaya redam bernilai maksimum ketika berada pada titik *displacement* 0 m atau piston berada pada posisi tengah *shock absorber*. Pada kondisi kompresi (pada grafik bernilai positif), piston yang bergerak dari titik tengah piston menuju ke titik batas bawah *shock absorber* akan mengalami pengurangan nilai gaya redam dari nilai maksimum sampai dengan gaya redam bernilai 0 N. Hal yang sama juga terjadi

saat kondisi ekspansi (pada grafik bernilai negatif), piston yang bergerak dari titik tengah piston menuju ke titik batas atas *shock absorber* akan mengalami pengurangan nilai gaya redam dari nilai maksimum sampai dengan gaya redam bernilai 0 N.



Gambar 4.2 Grafik Gaya Redam Terhadap Kecepatan *Shock Absorber* Konvensional

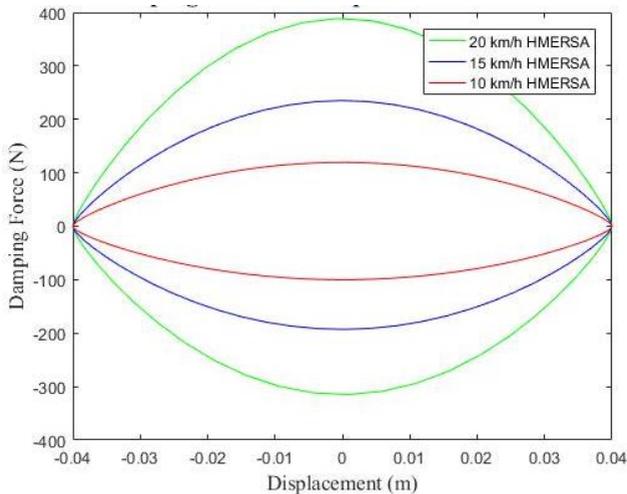
Dari gambar 4.1 dan 4.2, nilai gaya redam pada kecepatan kendaraan 10 km/jam paling kecil dibandingkan dengan kecepatan kendaraan lainnya, yaitu sebesar 115.8 N saat kondisi kompresi, dan 97.68 N saat kondisi ekspansi. Kecepatan *shock absorber* pada kondisi kompresi dan ekspansi adalah 2.654 m/s. Nilai gaya redam pada kecepatan kendaraan 15 km/jam bernilai 225.5 N saat kondisi kompresi dan 186.2 N saat kondisi ekspansi. Kecepatan *shock absorber* pada kondisi kompresi dan ekspansi adalah 3.911 m/s. Sedangkan nilai gaya redam paling tinggi didapatkan pada kecepatan kendaraan 20 km/jam yang bernilai 370.4 N saat kondisi

kompresi dan 301.8 N saat kondisi ekspansi. Kecepatan *shock absorber* pada kondisi kompresi dan ekspansi adalah 5.167 m/s.

Grafik di atas sesuai dengan teori, yaitu gaya redam yang semakin besar seiring dengan meningkatnya kecepatan kendaraan. Berdasarkan persamaan 2.19, ketika kecepatan kendaraan semakin tinggi, maka kecepatan *shock absorber* juga semakin tinggi. Dengan persamaan  $F_d = c\dot{x}$ , maka seiring dengan bertambahnya kecepatan *shock absorber*, gaya redam akan semakin besar. Gaya redam pada kondisi kompresi lebih besar daripada gaya redam pada kondisi ekspansi. Hal itu dikarenakan beda luas area kerja antara kondisi kompresi dan ekspansi. Berdasarkan persamaan  $F_d = PA$ , nilai gaya redam berbanding lurus dengan besar luasan area kerja. Luas area kerja silinder hidrolik saat kompresi lebih besar karena menggunakan luas piston ( $A_p$ ), sedangkan luas area kerja saat kondisi ekspansi menggunakan selisih antara luas piston dengan luas piston *rod* ( $A_p - A_{pr}$ ).

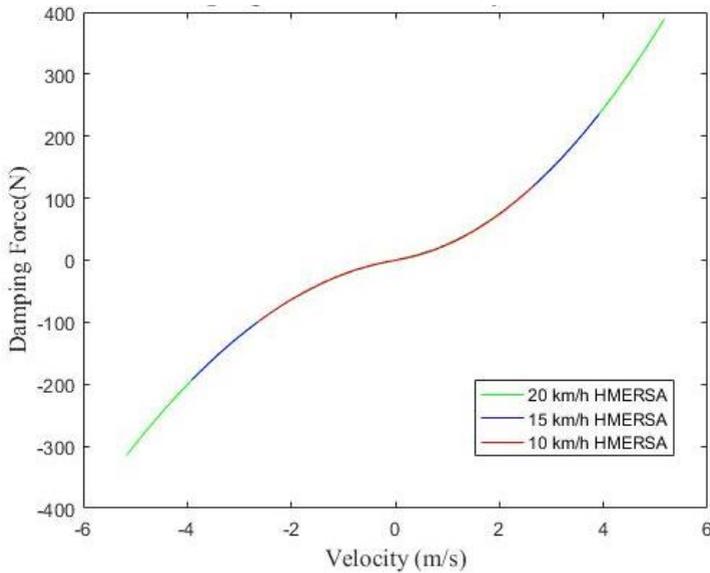
#### 4.1.3 Hasil Simulasi Sistem HMERSA dengan Variasi *Input* Frekuensi

Simulasi selanjutnya adalah simulasi sistem HMERSA pada seperempat kendaraan. Terdapat tiga variasi *input* frekuensi yang digunakan, yaitu sebesar 0.278 Hz atau dengan kecepatan kendaraan 10 km/jam, 0.417 Hz atau dengan kecepatan kendaraan 15 km/jam, dan 0.556 Hz atau dengan kecepatan kendaraan 20 km/jam. Setelah *M-File* dan blok diagram selesai disusun dan di jalankan tanpa adanya *error*, maka grafik yang sudah di plot akan muncul. Hasil dari simulasi sistem HMERSA ini adalah didapatkan 3 jenis grafik, yaitu grafik gaya redam terhadap perpindahan, grafik gaya redam terhadap kecepatan, dan grafik daya bangkitan terhadap waktu. Ketiga grafik tersebut ditunjukkan pada gambar 4.3, 4.4 dan 4.5.



Gambar 4.3 Grafik Gaya Redam Terhadap Perpindahan Sistem HMERSA

Pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa gaya redam bernilai maksimum ketika berada pada titik *displacement* 0 m atau piston berada pada posisi tengah *shock absorber*. Pada kondisi kompresi (pada grafik bernilai positif), piston yang bergerak dari titik tengah piston menuju ke titik batas bawah *shock absorber* akan mengalami pengurangan nilai gaya redam dari nilai maksimum sampai dengan gaya redam bernilai 0 N. Hal yang sama juga terjadi saat kondisi ekspansi (pada grafik bernilai negatif), piston yang bergerak dari titik tengah piston menuju ke titik batas atas *shock absorber* akan mengalami pengurangan nilai gaya redam dari nilai maksimum sampai dengan gaya redam bernilai 0 N.

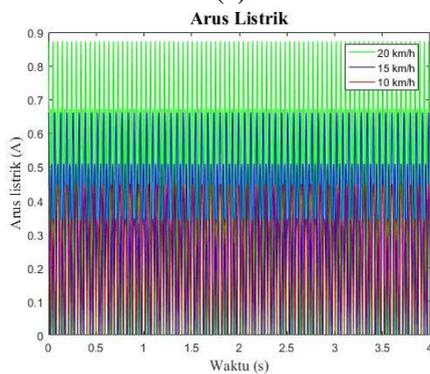
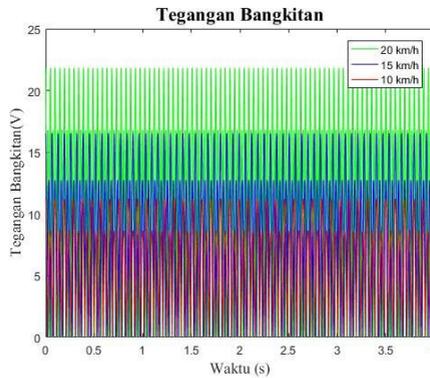


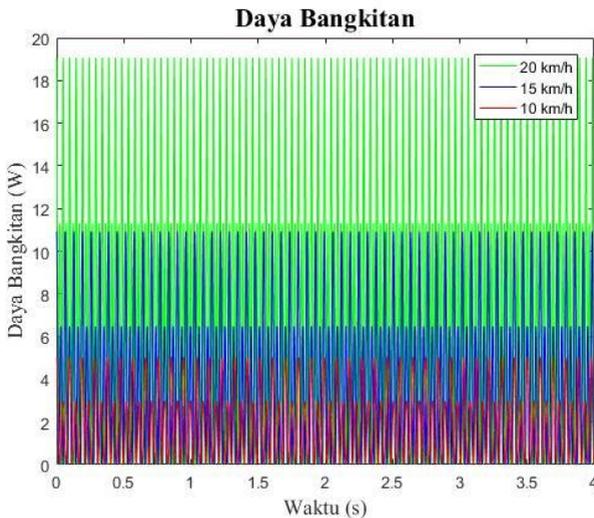
Gambar 4.4 Grafik Gaya Redam Terhadap Kecepatan Sistem HMERSA

Dari gambar 4.3 dan 4.4, nilai gaya redam pada kecepatan kendaraan 10 km/jam paling kecil dibandingkan dengan kecepatan kendaraan lainnya, yaitu sebesar 119.4 N saat kondisi kompresi, dan 99.99 N saat kondisi ekspansi. Kecepatan *shock absorber* pada kondisi kompresi dan ekspansi adalah 2.654 m/s. Nilai gaya redam pada kecepatan kendaraan 15 km/jam bernilai 235.1 N saat kondisi kompresi dan 192.9 N saat kondisi ekspansi. Kecepatan *shock absorber* pada kondisi kompresi dan ekspansi adalah 3.911 m/s. Sedangkan nilai gaya redam paling tinggi didapatkan pada kecepatan kendaraan 20 km/jam yang bernilai 388.8 N saat kondisi kompresi dan 314.9 N saat kondisi ekspansi. Kecepatan *shock absorber* pada kondisi kompresi dan ekspansi adalah 5.167 m/s.

Grafik di atas sesuai dengan teori, yaitu gaya redam yang semakin besar seiring dengan meningkatnya kecepatan kendaraan. Berdasarkan persamaan 2.19, ketika kecepatan kendaraan semakin tinggi, maka kecepatan *shock absorber* juga semakin tinggi.

Dengan persamaan  $F_d = c\dot{x}$ , maka seiring dengan bertambahnya kecepatan *shock absorber*, gaya redam akan semakin besar gaya redam pada kondisi kompresi lebih besar daripada gaya redam pada kondisi ekspansi. Hal itu dikarenakan beda luas area kerja antara kondisi kompresi dan ekspansi. Berdasarkan persamaan  $F_d = PA$ , nilai gaya redam berbanding lurus dengan besar luasan area kerja. Luas area kerja silinder hidrolik saat kompresi lebih besar karena menggunakan luas piston ( $A_p$ ), sedangkan luas area kerja saat kondisi ekspansi menggunakan selisih antara luas piston dengan luas piston *rod* ( $A_p - A_{pr}$ ).





Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Simulasi (a) Tegangan Bangkitan, (b) Arus Listrik, (c) Daya Bangkitan pada sistem HMERSA

Grafik 4.5 menunjukkan hasil simulasi tegangan bangkitan, arus listrik bangkitan, dan daya bangkitan yang dihasilkan oleh sistem HMERSA. Pada kecepatan kendaraan 10 km/jam, didapatkan tegangan bangkitan sebesar 11.21 V, arus listrik bangkitan sebesar 0.4486 A, dan daya bangkitan sebesar 5.03 W. Pada kecepatan 15 km/jam, didapatkan tegangan bangkitan sebesar 16.53 V, arus listrik bangkitan sebesar 0.6575 A, dan daya bangkitan sebesar 10.93 W, dan pada kecepatan 20 km/jam, didapatkan tegangan bangkitan sebesar 21.83 V, arus listrik bangkitan sebesar 0.8733 A, dan daya bangkitan sebesar 19.07 W seperti ditunjukkan pada tabel 4.1.

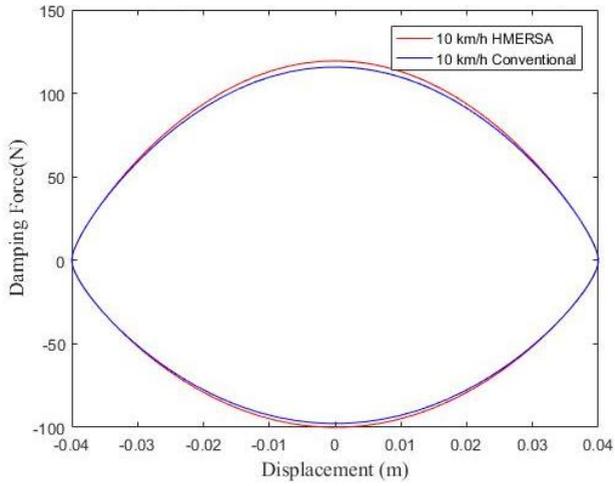
Tabel 4.1 Perbandingan Simulasi Nilai Energi Bangkitan pada Sistem HMERSA

<b>Kecepatan Kendaraan</b>	<b>Tegangan Bangkitan (V)</b>	<b>Arus Listrik Bangkitan (A)</b>	<b>Daya Bangkitan (W)</b>
<b>10 km/jam</b>	11.21 V	0.4486 A	5.03 W
<b>15 km/jam</b>	16.53 V	0.6575 A	10.93 W
<b>20 km/jam</b>	21.83 V	0.8733 A	19.07 W

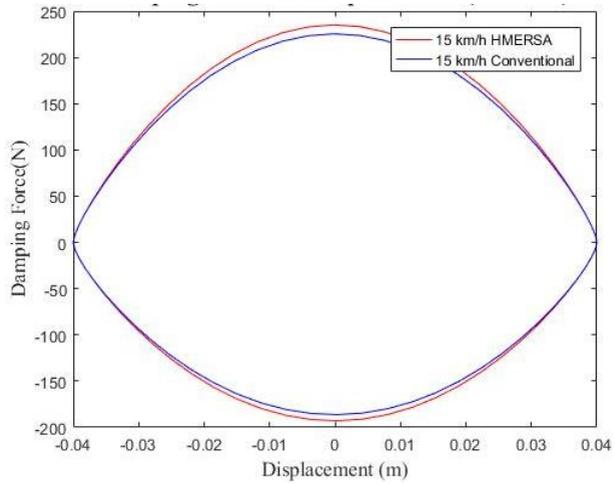
Hasil yang didapatkan tersebut sesuai dengan teori. Ketika kecepatan kendaraan rendah, maka saat melewati *bump*, perpindahan dan gaya redam *shock absorber* lebih kecil, sehingga fluida yang melewati motor hidrolis juga sedikit. Hal itu mengakibatkan kecilnya daya bangkitan yang dihasilkan. Sebaliknya, ketika kecepatan kendaraan tinggi, perpindahan dan gaya redam *shock absorber* akan besar, sehingga fluida yang melewati *shock absorber* juga akan banyak dan daya bangkitan yang dihasilkan lebih tinggi.

#### **4.1.4 Perbandingan Hasil Simulasi *Shock Absorber* Konvensional dengan Sistem HMERSA**

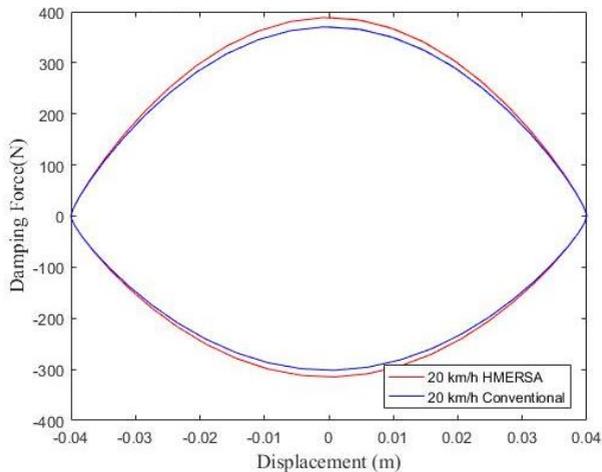
Setelah didapatkan hasil simulasi *shock absorber* konvensional dan sistem HMERSA, perlu dilakukan perbandingan antara karakteristik kedua sistem tersebut. Untuk mengetahui apakah sistem HMERSA dapat diimplementasikan pada kendaraan. Grafik perbandingan gaya redam terhadap perpindahan dan gaya redam terhadap kecepatan antara sistem *shock absorber* konvensional dan sistem HMERSA ditunjukkan pada gambar 4.6.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Gaya Redam Terhadap Perpindahan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, (c) 20 km/jam

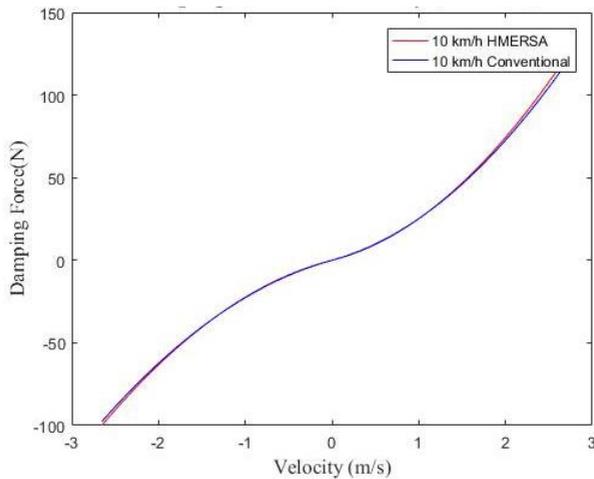
Dari hasil perbandingan pada gambar 4.6, dapat dilihat nilai gaya redam pada sistem HMERSA selalu lebih besar daripada *shock absorber* konvensional. Perbandingan nilai tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 membuktikan bahwa nilai gaya redam pada *shock absorber* konvensional selalu bernilai lebih kecil dibandingkan dengan gaya redam sistem HMERSA. Hal itu juga dapat dilihat pada gambar 4.7 dengan perbandingan gaya redam terhadap kecepatan antara *shock absorber* konvensional dengan sistem HMERSA. Hasil tersebut sesuai dengan teori. Pada sistem HMERSA, terdapat berbagai komponen tambahan yang dipasang, seperti pipa, *check valve*, motor hidrolik, dan lain-lain. Dengan adanya tambahan komponen-komponen tersebut, maka *losses* yang terjadi juga akan bertambah banyak, sehingga gaya yang diperlukan untuk menyalurkan fluida semakin besar dan meningkatkan gaya redam yang dihasilkan. Sedangkan pada *shock absorber* konvensional, tidak terdapat komponen-komponen

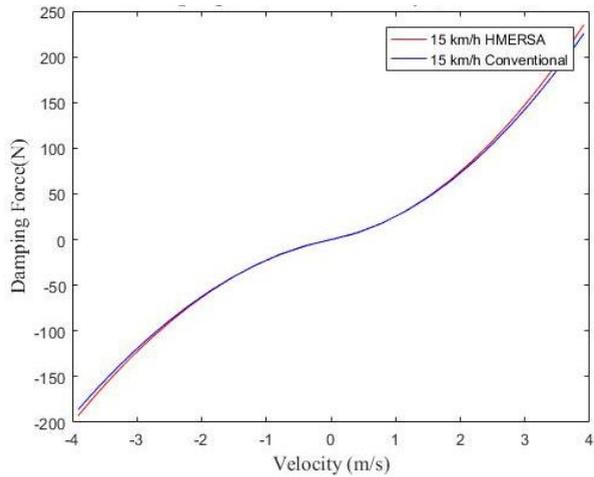
tambahan, sehingga gaya redam yang dihasilkan bernilai lebih kecil daripada sistem HMERSA.

Tabel 4.2 Perbandingan Simulasi Gaya Redam *Shock Absorber* Konvensional terhadap Sistem HMERSA

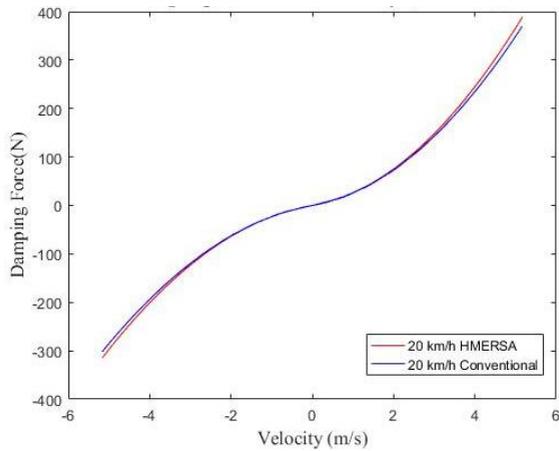
Kecepatan Kendaraan	Gaya Redam Kompresi (N)		Gaya Redam Ekspansi (N)	
	<i>Shock Absorber</i> Konvensional	Sistem HMERSA	<i>Shock Absorber</i> Konvensional	Sistem HMERSA
<b>10 km/jam</b>	115.8 N	119.4 N	97.68 N	99.99 N
<b>15 km/jam</b>	225.5 N	235.1 N	186.2 N	192.9 N
<b>20 km/jam</b>	370.4 N	388.8 N	301.8 N	314.9 N



(a)



(b)

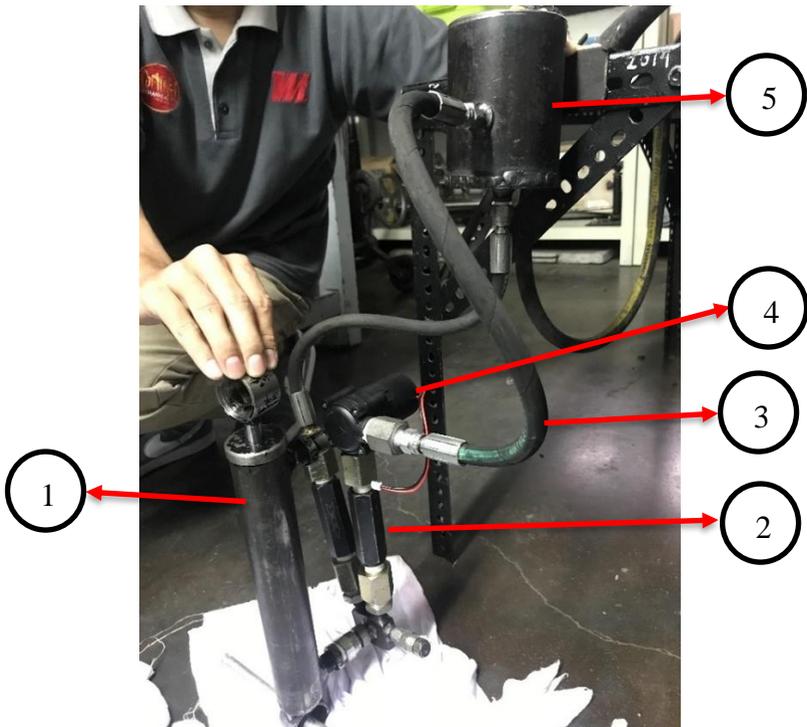


(c)

Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Gaya Redam Terhadap Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, (c) 20 km/jam

## 4.2 Pengujian Sistem HMERSA pada Kendaraan Angkut

HMERSA yang telah selesai di desain kemudian dirakit dengan gabungan beberapa komponen, seperti pipa, *check valve*, *hydroelectric power generator*, dan lain-lain. Gambar dari HMERSA yang telah dirakit ditunjukkan pada gambar 4.8. Setelah dirakit, maka HMERSA dipasang pada kendaraan angkut.



Gambar 4.8 Sistem HMERSA

Keterangan gambar:

- 1 = *shock absorber* HMERSA
- 2 = *check valve*
- 3 = pipa Ø ¼ in

- 4 = *hydroelectric power generator*  
5 = *reservoir oli suspensi*

#### 4.2.1 Pemasangan Sistem HMERSA pada Kendaraan Angkut

Pengujian sistem HMERSA dilakukan pada kendaraan angkut berjenis Daihatsu Gran Max. Daihatsu Gran Max dipilih karena merupakan salah satu jenis kendaraan angkut yang paling banyak digunakan oleh masyarakat Indonesia, ataupun pelaku usaha yang akan memindahkan/mengirimkan barang dagangannya. Selain itu, bagian bawah bak dari Daihatsu Gran Max juga luas, sehingga memudahkan pemasangan HMERSA tersebut. Bagian bawah bak dan proses pemasangan HMERSA dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Bagian Bawah Bak Daihatsu Gran Max

Proses pemasangan HMERSA dimulai dengan melepas *shock absorber* konvensional pada sebelah kanan kendaraan. Sisi sebelah kanan kendaraan dipilih karena bentuk dari sistem HMERSA yang cocok untuk dipasang pada sebelah kanan, dan juga karena posisi *shock absorber* sebelah kanan tidak tertutup oleh as roda, sehingga proses pemasangan akan lebih mudah. Setelah *shock absorber* dilepas, sistem HMERSA dipasang menggantikan tempat *shock absorber* sebelumnya. Untuk bagian *reservoir*, dipasang pada bagian bak yang lebih tinggi agar aliran oli suspensi lebih lancar.



Gambar 4.10 HMERSA yang Terpasang pada Kendaraan Angkut

#### 4.2.2 Instalasi Peralatan Pengambilan Data

Setelah HMERSA dipasang, peralatan lain untuk menunjang proses pengambilan data juga dipasang. Alat-alat yang digunakan untuk mengambil data terdiri dari:

- **Oscilloscope Tektronix TBS1104:** Digunakan sebagai media penerima data dari *accelerometer* dan *probe* tegangan.



Gambar 4.11 *Oscilloscope* Tektronix TBS1104

- **Converter Tegangan DC ke AC:** Digunakan untuk mengubah tegangan DC dari aki mobil menjadi tegangan AC untuk memberikan daya kepada *oscilloscope*.



Gambar 4.12 *Converter* Tegangan DC ke AC

- ***Inverter***: Berfungsi untuk memperkuat sinyal dari *accelerometer* menuju ke *oscilloscope*.



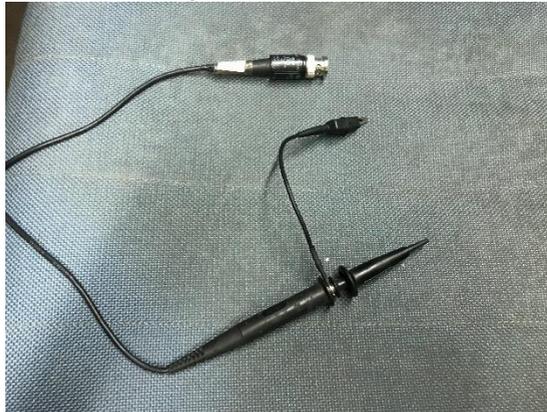
Gambar 4.13 *Inverter*

- ***Accelerometer***: Ditempelkan pada permukaan bak untuk mengukur data percepatan.



Gambar 4.14 *Probe Accelerometer*

- **Probe Tegangan:** Untuk mengukur tegangan yang dihasilkan oleh generator HMERSA.



Gambar 4.15 *Probe Tegangan*

Saat pengambilan data, semua peralatan diletakkan di bak belakang untuk memudahkan proses pengambilan data. Urutan pemasangan peralatan adalah pertama *converter* tegangan DC ke AC dihubungkan dengan sumber daya dari aki mobil. Setelah *converter* terhubung, daya disambungkan ke *oscilloscope* sehingga

menyala. Kemudian *channel* 1 pada *oscilloscope* dihubungkan pada probe tegangan yang telah tersambung dengan kabel dari generator. Channel 2 dari *oscilloscope* disambungkan dengan *inverter* dan *accelerometer*. Instalasi alat pengambilan data dapat dilihat pada gambar 4.16.



Gambar 4.16 Instalasi Peralatan Pengambilan Data

Keterangan gambar:

- 1 = *oscilloscope* Tektronix TBS1104
- 2 = *inverter*
- 3 = *probe* tegangan
- 4 = *accelerometer*

### 4.2.3 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan lokasi di dalam lingkungan kampus ITS Surabaya, dengan jalan di depan perumahan dosen blok U. Pengambilan data dilakukan dengan variasi kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam dan 20 km/jam saat melewati *bump*. Diperlukan setidaknya tiga orang untuk melaksanakan pengambilan data, yaitu satu orang pengemudi

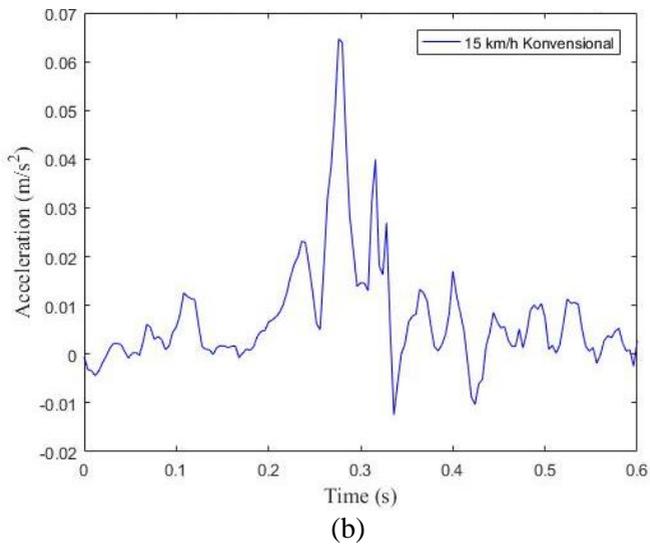
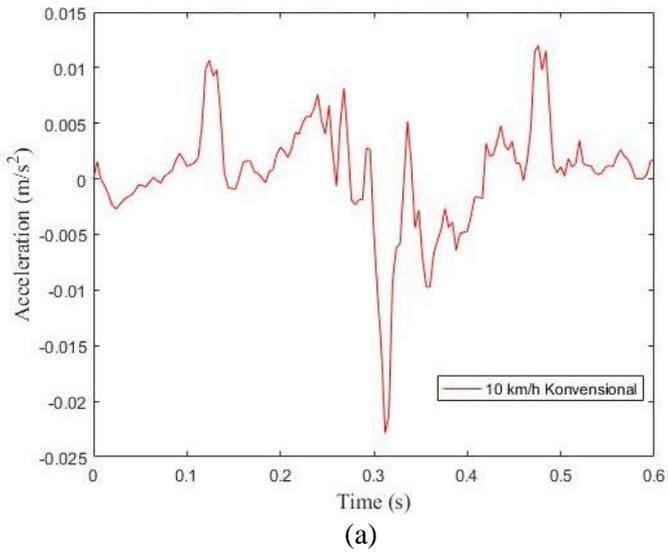
mobil, satu operator peralatan pengambilan data, dan satu orang untuk dokumentasi.

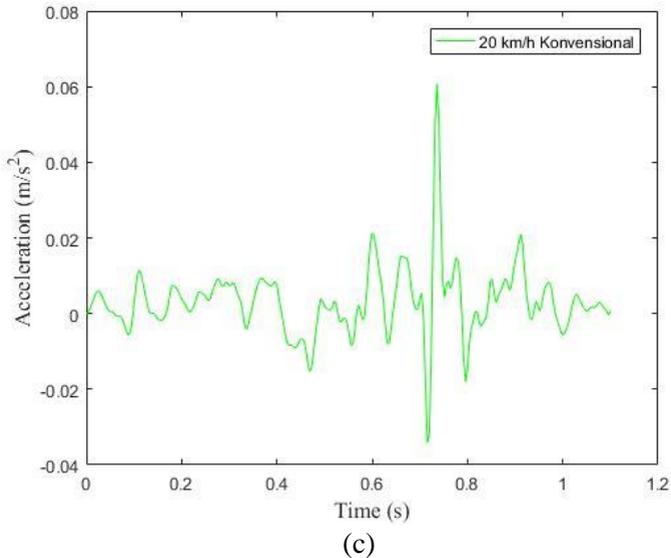
### **4.3 Analisis Hasil Pengambilan Data**

Setelah dilakukan pengambilan data, maka data tersebut diolah dan dilakukan analisis. Pengolahan data dilakukan dengan *software* Microsoft Excel dan juga MATLAB. Data yang didapatkan dari *oscilloscope* tidak dapat langsung digunakan sebagai hasil akhir karena terdapat terlalu banyak *noise* yang muncul pada saat pengujian. *Noise* yang muncul tersebut dapat di minimalkan dengan menggunakan program *filtering* dan *smoothing* yang tersedia dalam *software* MATLAB. Variasi yang dilakukan adalah dengan variasi kecepatan kendaraan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam.

#### **4.3.1 Analisis Respon Percepatan *Shock Absorber* Konvensional**

Respon percepatan *shock absorber* konvensional didapatkan dari *probe accelerometer* yang dipasang pada bak sebelah kiri atau di atas *shock absorber* konvensional. *Accelerometer* tersebut mengirimkan data ke *inverter* dan sinyal yang diterima diperbesar, sehingga *oscilloscope* dapat membaca hasil yang didapatkan dari *accelerometer*. Hasil yang didapatkan pada *oscilloscope* berupa voltase, sehingga perlu dilakukan pengolahan lagi dalam *software* Microsoft Excel untuk mendapatkan respon percepatan. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan respon percepatan dari hasil *oscilloscope* ditunjukkan pada persamaan 3.13.





Gambar 4.17 Grafik Respon Percepatan *Shock Absorber* Konvensional Terhadap Waktu pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, (c) 20 km/jam

Gambar 4.17 menunjukkan respon percepatan kendaraan saat melewati *bump* dengan kecepatan 10 km/jam. Respon percepatan maksimum yang didapatkan sebesar  $0.012 m/s^2$ . Kecepatan kendaraan 15 km/jam dengan respon percepatan maksimum sebesar  $0.064 m/s^2$ , dan kecepatan kendaraan 20 km/jam dengan respon percepatan maksimum sebesar  $0.068 m/s^2$ .

### 4.3.2 Perbandingan Respon Percepatan *Shock Absorber* Konvensional dengan Variasi Kecepatan Kendaraan

Setelah dilakukan analisis respon percepatan pada masing-masing kecepatan kendaraan, maka ketiga hasil tersebut dibandingkan dalam satu grafik. Perbandingan tersebut dilakukan untuk mengetahui perbedaan karakteristik yang terjadi pada saat kecepatan kendaraan yang berbeda-beda. Kecepatan kendaraan yang dibandingkan adalah kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Perbandingan respon percepatan *shock absorber* konvensional dapat dilihat pada gambar 4.18, dan data perbandingan nilai respon percepatan maksimum dapat dilihat pada tabel 4.3.

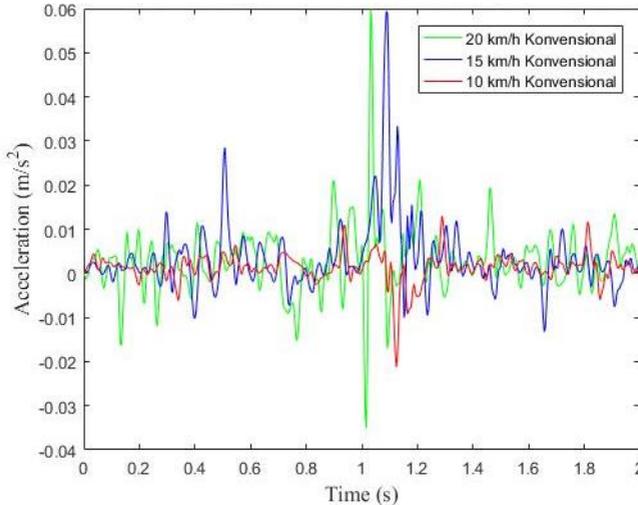
Tabel 4.3 Perbandingan Respon Percepatan Maksimum *Shock Absorber* Konvensional

Kecepatan (km/jam)	Respon Percepatan Maksimum (m/s <sup>2</sup> )
10 km/jam	0.012 m/s <sup>2</sup>
15 km/jam	0.064 m/s <sup>2</sup>
20 km/jam	0.068 m/s <sup>2</sup>

Pada gambar 4.18, dapat dilihat bahwa respon percepatan pada kecepatan 10 km/jam memiliki nilai maksimum terkecil, yaitu sebesar 0.012 m/s<sup>2</sup>, kemudian respon percepatan pada kecepatan 15 km/jam yaitu sebesar 0.064 m/s<sup>2</sup>, dan yang terbesar pada kecepatan kendaraan 20 km/jam, yaitu sebesar 0.068 m/s<sup>2</sup>.

Berdasarkan data yang diperoleh, terlihat bahwa semakin tinggi kecepatan kendaraan, respon percepatan juga semakin meningkat. Hal itu dikarenakan ketika kecepatan kendaraan tinggi dan melewati *bump*, gaya redam yang dihasilkan juga akan besar sesuai dengan persamaan  $F_d = c\dot{x}$ . Sehingga berdasarkan

persamaan 2.19, ketika kecepatan kendaraan semakin tinggi, respon percepatan juga semakin tinggi.



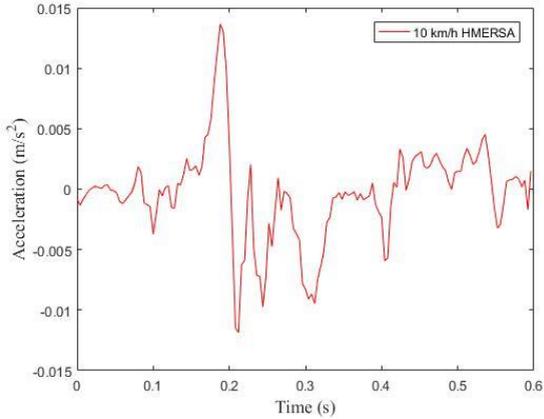
Gambar 4.18 Grafik Perbandingan Respon Percepatan pada *Shock Absorber* Konvensional (10 km/jam, 15 km/jam, 20 km/jam)

### 4.3.3 Analisis Respon Percepatan HMERSA

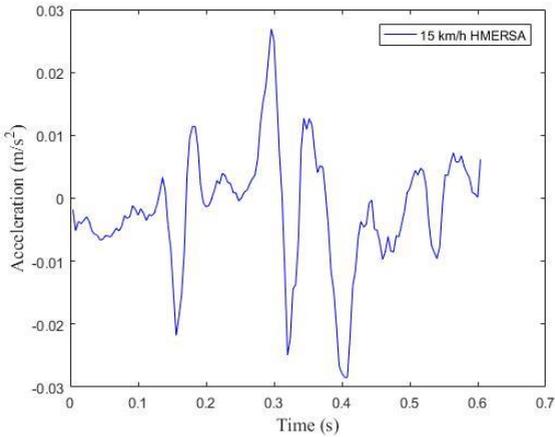
Respon percepatan HMERSA didapatkan dari *probe accelerometer* yang dipasang pada bak sebelah kanan atau di atas sistem HMERSA. *Accelerometer* tersebut mengirimkan data ke *inverter* dan sinyal yang diterima diperbesar, sehingga *oscilloscope* dapat membaca hasil yang didapatkan dari *accelerometer*. Hasil yang didapatkan pada *oscilloscope* berupa voltase, sehingga perlu dilakukan pengolahan lagi dalam *software* Microsoft Excel untuk mendapatkan respon percepatan. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan respon percepatan dari hasil *oscilloscope* ditunjukkan pada persamaan 3.13.

Gambar 4.19 menunjukkan respon percepatan kendaraan saat melewati *bump* dengan kecepatan 10 km/jam. Respon

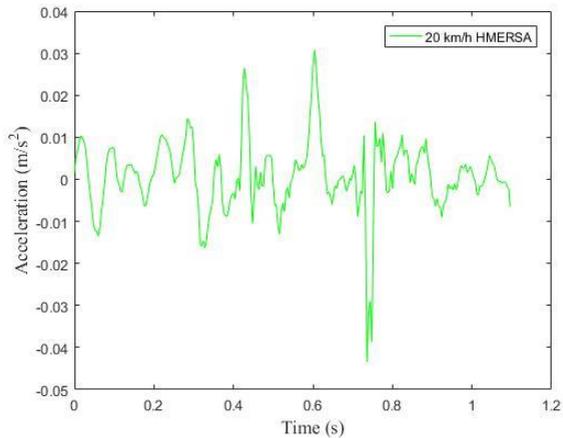
percepatan maksimum yang didapatkan sebesar  $0.0136 \text{ m/s}^2$ . Kecepatan kendaraan  $15 \text{ km/jam}$  dengan respon percepatan maksimum sebesar  $0.0268 \text{ m/s}^2$ , dan kecepatan kendaraan  $20 \text{ km/jam}$  dengan respon percepatan maksimum sebesar  $0.0308 \text{ m/s}^2$ .



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.19 Grafik Respon Percepatan Sistem HMERSA Terhadap Waktu pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, (c) 20 km/jam

#### 4.3.4 Perbandingan Respon Percepatan HMERSA dengan Variasi Kecepatan Kendaraan

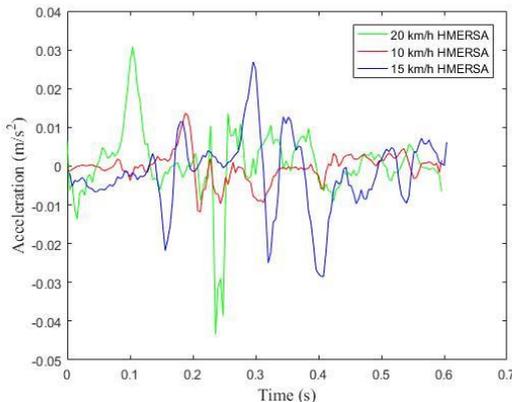
Setelah dilakukan analisis respon percepatan pada masing-masing kecepatan kendaraan, maka ketiga hasil tersebut dibandingkan dalam satu grafik. Perbandingan tersebut dilakukan untuk mengetahui perbedaan karakteristik yang terjadi pada saat kecepatan kendaraan yang berbeda-beda. Kecepatan kendaraan yang dibandingkan adalah kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Perbandingan respon percepatan sistem HMERSA dapat dilihat pada gambar 4.24, dan data perbandingan nilai respon percepatan maksimum dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perbandingan Respon Percepatan Maksimum HMERSA

Kecepatan (km/jam)	Respon Percepatan Maksimum (m/s <sup>2</sup> )
10 km/jam	0.0136 m/s <sup>2</sup>
15 km/jam	0.0268 m/s <sup>2</sup>
20 km/jam	0.0308 m/s <sup>2</sup>

Pada gambar 4.20, dapat dilihat bahwa respon percepatan pada kecepatan 10 km/jam memiliki nilai maksimum terkecil, yaitu sebesar 0.0136 m/s<sup>2</sup>, kemudian respon percepatan pada kecepatan 15 km/jam yaitu sebesar 0.0268 m/s<sup>2</sup>, dan yang terbesar pada kecepatan kendaraan 20 km/jam, yaitu sebesar 0.0308 m/s<sup>2</sup>.

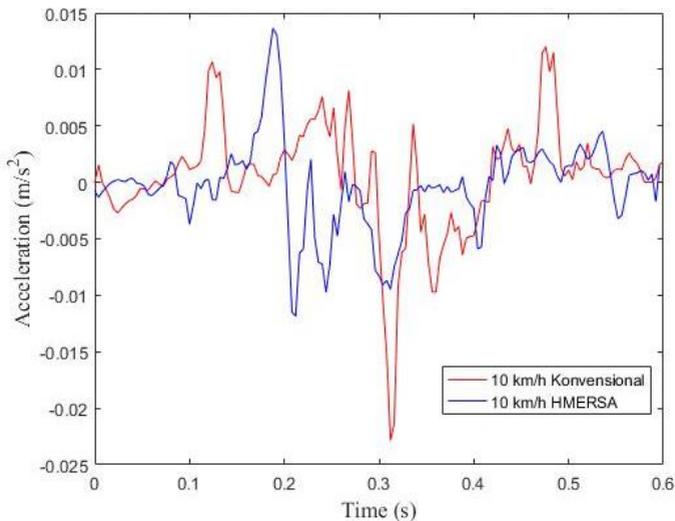
Berdasarkan data yang diperoleh, terlihat bahwa semakin tinggi kecepatan kendaraan, respon percepatan juga semakin meningkat. Hal itu dikarenakan ketika kecepatan kendaraan tinggi dan melewati *bump*, gaya redam yang dihasilkan juga akan besar sesuai dengan persamaan  $F_d = c\dot{x}$ . Sehingga berdasarkan persamaan 2.19, ketika kecepatan kendaraan semakin tinggi, respon percepatan juga semakin tinggi.



Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Respon Percepatan pada HMERSA (10 km/jam, 15 km/jam, 20 km/jam)

### 4.3.5 Perbandingan Respon Percepatan *Shock Absorber* Konvensional dengan HMERSA pada Kecepatan 10 km/jam

Respon percepatan yang telah didapatkan dari eksperimen kemudian dibandingkan dalam satu grafik. Perbandingan dilakukan untuk mengetahui perbedaan karakteristik antara *shock absorber* konvensional dengan HMERSA. Perbandingan tersebut ditunjukkan pada gambar 4.21.



Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Respon Percepatan pada *Shock Absorber* Konvensional dengan HMERSA (10 km/jam)

Pada gambar 4.21, terlihat bahwa respon percepatan pada HMERSA dengan nilai  $0.0136 \text{ m/s}^2$  lebih besar daripada respon percepatan *shock absorber* konvensional dengan nilai  $0.012 \text{ m/s}^2$  seperti ditunjukkan pada tabel 4.5. Perbandingan respon percepatan yang didapatkan pada pengujian dengan kecepatan kendaraan 10 km/jam tidak sesuai dengan teori. Berdasarkan teori, semakin tinggi gaya redam, semakin kecil respon percepatan yang

dihasilkan. Selisih antara gaya dari *bump* (Ft) dengan gaya redam akan menjadi lebih kecil ketika gaya redam tinggi, sehingga ketika dibagi dengan massa kendaraan, respon percepatan yang dihasilkan juga akan semakin kecil.

Hasil data yang didapatkan dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti keausan silinder HMERSA sehingga mengurangi gaya redam yang dihasilkan, dan juga kecepatan pengujian kendaraan yang tidak tepat.

Tabel 4.5 Perbandingan Nilai Respon Percepatan pada *Shock Absorber* Konvensional dengan HMERSA (10 km/jam)

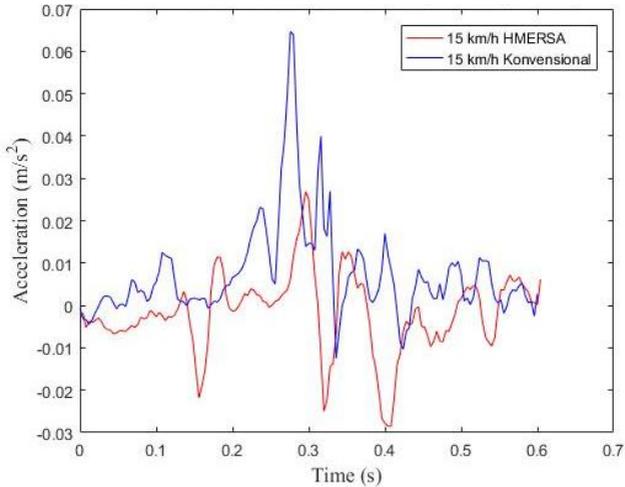
	<b>Respon Percepatan Maksimum (m/s<sup>2</sup>)</b>
<b>HMERSA</b>	0.0136 m/s <sup>2</sup>
<b><i>Shock Absorber</i> Konvensional</b>	0.012 m/s <sup>2</sup>

#### **4.3.6 Perbandingan Respon Percepatan *Shock Absorber* Konvensional dengan HMERSA pada Kecepatan 15 km/jam**

Respon percepatan yang telah didapatkan dari eksperimen kemudian dibandingkan dalam satu grafik. Perbandingan dilakukan untuk mengetahui perbedaan karakteristik antara *shock absorber* konvensional dengan HMERSA. Perbandingan tersebut ditunjukkan pada gambar 4.22.

Pada gambar 4.22, terlihat bahwa respon percepatan pada HMERSA dengan nilai 0.0268 m/s<sup>2</sup> lebih kecil daripada respon percepatan *shock absorber* konvensional dengan nilai 0.064 m/s<sup>2</sup> seperti ditunjukkan pada tabel 4.6. Perbandingan respon percepatan yang didapatkan pada pengujian dengan kecepatan kendaraan 15 km/jam sesuai dengan teori. Berdasarkan teori, semakin tinggi gaya redam, semakin kecil respon percepatan yang dihasilkan. Selisih antara gaya dari *bump* (Ft) dengan gaya redam akan menjadi lebih kecil ketika gaya redam tinggi, sehingga ketika

dibagi dengan massa kendaraan, respon percepatan yang dihasilkan juga akan semakin kecil. Dalam hal ini, gaya redam dari sistem HMERSA lebih besar daripada gaya redam *shock absorber* konvensional, sehingga hasil yang didapatkan sudah sesuai dengan teori.



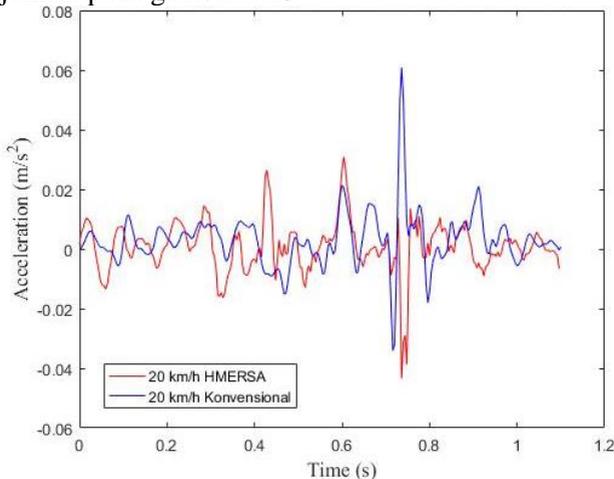
Gambar 4.22 Grafik Perbandingan Respon Percepatan pada *Shock Absorber* Konvensional dengan HMERSA (15 km/jam)

Tabel 4.6 Perbandingan Nilai Respon Percepatan pada *Shock Absorber* Konvensional dengan HMERSA (15 km/jam)

	<b>Respon Percepatan Maksimum (m/s<sup>2</sup>)</b>
<b>HMERSA</b>	0.0268 m/s <sup>2</sup>
<b><i>Shock Absorber</i> Konvensional</b>	0.064 m/s <sup>2</sup>

#### 4.3.7 Perbandingan Respon Percepatan *Shock Absorber* Konvensional dengan HMERSA pada Kecepatan 20 km/jam

Respon percepatan yang telah didapatkan dari eksperimen kemudian dibandingkan dalam satu grafik. Perbandingan dilakukan untuk mengetahui perbedaan karakteristik antara *shock absorber* konvensional dengan HMERSA. Perbandingan tersebut ditunjukkan pada gambar 4.23.



Gambar 4.23 Grafik Perbandingan Respon Percepatan pada *Shock Absorber* Konvensional dengan HMERSA (20 km/jam)

Pada gambar 4.23, terlihat bahwa respon percepatan pada HMERSA dengan nilai  $0.0308 \text{ m/s}^2$  lebih kecil daripada respon percepatan *shock absorber* konvensional dengan nilai  $0.068 \text{ m/s}^2$  seperti ditunjukkan pada tabel 4.7. Perbandingan respon percepatan yang didapatkan pada pengujian dengan kecepatan kendaraan 20 km/jam sesuai dengan teori. Berdasarkan teori, semakin tinggi gaya redam, semakin kecil respon percepatan yang dihasilkan. Selisih antara gaya dari *bump* (Ft) dengan gaya redam akan

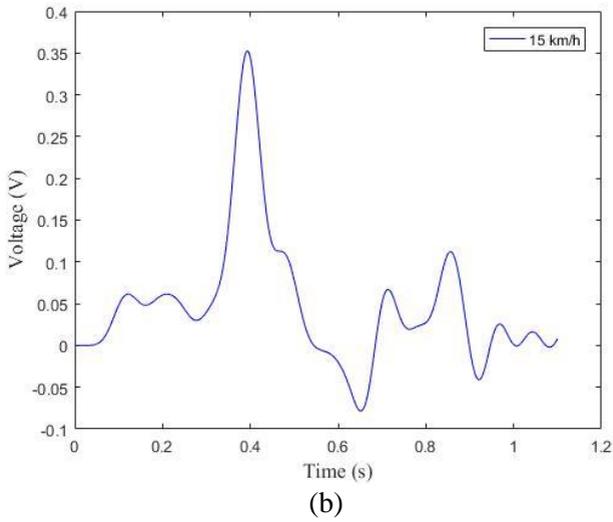
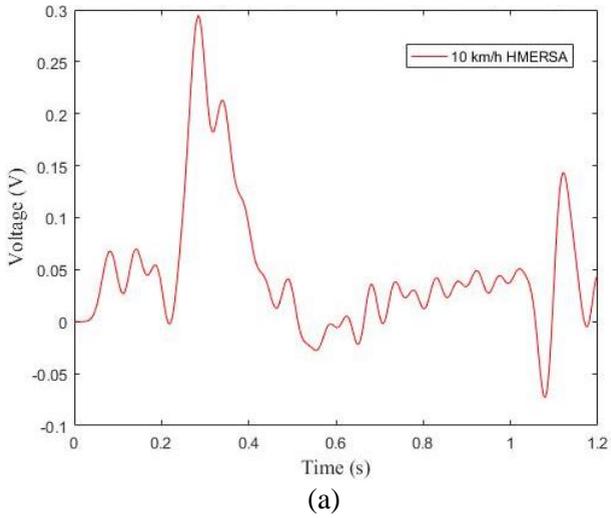
menjadi lebih kecil ketika gaya redam tinggi, sehingga ketika dibagi dengan massa kendaraan, respon percepatan yang dihasilkan juga akan semakin kecil. Dalam hal ini, gaya redam dari sistem HMERSA lebih besar daripada gaya redam *shock absorber* konvensional, sehingga hasil yang didapatkan sudah sesuai dengan teori.

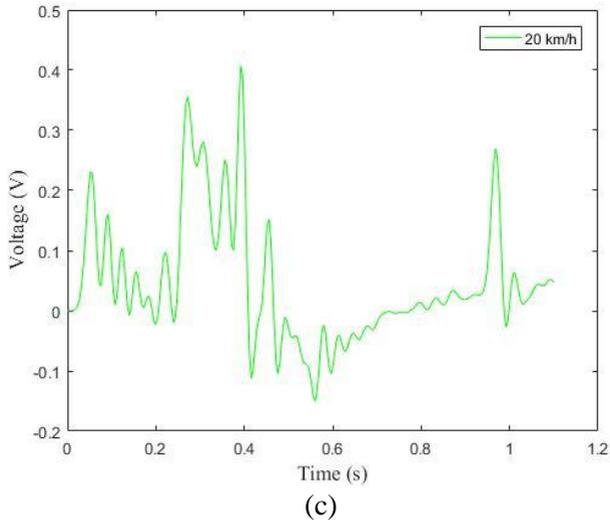
Tabel 4.7 Perbandingan Nilai Respon Percepatan pada *Shock Absorber* Konvensional dengan HMERSA (20 km/jam)

	<b>Respon Percepatan Maksimum (m/s<sup>2</sup>)</b>
<b>HMERSA</b>	0.0308 m/s <sup>2</sup>
<b><i>Shock Absorber</i> Konvensional</b>	0.068 m/s <sup>2</sup>

#### **4.3.8 Analisis Tegangan Bangkitan oleh *Hydroelectric Power Generator* pada Sistem HMERSA**

Sistem HMERSA yang dipasang pada kendaraan dapat menghasilkan energi dari pemanfaatan fluida oli suspensi yang mengalir akibat tekanan oleh piston yang mendapatkan gaya dari *bump*. Fluida tersebut kemudian memutar *hydroelectric power generator* yang kemudian dapat menghasilkan listrik. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator kemudian didata oleh *oscilloscope*, dan dilakukan *filtering* dan *smoothing* untuk menghilangkan *noise*. Tegangan yang dihasilkan oleh generator saat kendaraan melewati *bump* pada kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam dan 20 km/jam dapat dilihat pada gambar 4.24.





Gambar 4.24 Grafik Tegangan Bangkitan Terhadap Waktu pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, (c) 20 km/jam

Pada grafik di atas terlihat bahwa tegangan maksimum yang didapatkan pada kecepatan 10 km/jam adalah sebesar 0.298 V, dengan  $V_{RMS}$  yang didapatkan sebesar 0.105 V. Tegangan maksimum yang didapatkan pada kecepatan 15 km/jam adalah sebesar 0.353 V, dengan  $V_{RMS}$  yang didapatkan sebesar 0.124 V. Tegangan maksimum yang didapatkan pada kecepatan 20 km/jam adalah sebesar 0.407 V, dengan  $V_{RMS}$  yang didapatkan sebesar 0.143 V.

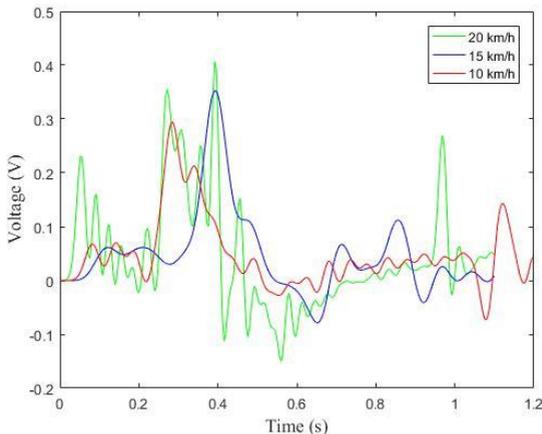
#### 4.3.9 Perbandingan Tegangan Bangkitan HMERSA pada Kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam

Data energi bangkitan yang didapatkan dari eksperimen dibandingkan dengan kecepatan yang berbeda dalam satu grafik.

Perbandingan dilakukan untuk mengetahui pengaruh kecepatan kendaraan terhadap energi bangkitan yang dihasilkan. Perbandingan energi bangkitan tersebut ditunjukkan pada gambar 4.25.

Pada gambar 4.25, terlihat bahwa tegangan bangkitan paling kecil terjadi pada kecepatan kendaraan 10 km/jam, yaitu sebesar 0.298 V, kemudian tegangan bangkitan pada kecepatan kendaraan 15 km/jam yaitu sebesar 0.353 V, dan tegangan bangkitan terbesar terjadi pada kecepatan kendaraan 20 km/jam, yaitu sebesar 0.407 V seperti ditunjukkan pada tabel 4.8.

Data tersebut sudah sesuai teori, di mana dengan penambahan nilai kecepatan kendaraan, maka energi bangkitan akan semakin besar. Hal itu dikarenakan gaya redam yang tinggi saat kecepatan kendaraan tinggi. Dengan gaya redam yang tinggi tersebut, maka oli suspensi akan menerima gaya yang lebih besar, sehingga aliran oli suspensi akan lebih kuat memutar motor hidrolis. Hal sebaliknya terjadi pada kecepatan rendah dengan gaya redam yang kecil, sehingga aliran oli suspensi menerima gaya yang lebih kecil, dan gaya untuk memutar motor hidrolis akan menjadi lebih kecil.



Gambar 4.25 Grafik Perbandingan Tegangan Bangkitan Terhadap Waktu (10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam)

Tabel 4.8 Perbandingan Tegangan Bangkitan Maksimum (10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam)

<b>Kecepatan (km/jam)</b>	<b>Tegangan Bangkitan (V)</b>
<b>10 km/jam</b>	0.298 V
<b>15 km/jam</b>	0.353 V
<b>20 km/jam</b>	0.407 V

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah:

1. Telah dikembangkan *prototype* HMERSA yang digunakan untuk kendaraan angkut.
2. Karakteristik gaya redam untuk *shock absorber* konvensional telah didapatkan dari hasil simulasi, yaitu 115.8 N pada kecepatan 10 km/jam, 225.5 N pada 15 km/jam, dan 370.4 N pada 20 km/jam. Semakin tinggi kecepatan kendaraan, semakin besar gaya redam yang dihasilkan.
3. Respon percepatan untuk *shock absorber* konvensional telah didapatkan dari hasil pengujian, yaitu 0.012 m/s<sup>2</sup> pada kecepatan 10 km/jam, 0.064 m/s<sup>2</sup> pada 15 km/jam, dan 0.068 m/s<sup>2</sup> pada 20 km/jam. Semakin tinggi kecepatan kendaraan, semakin besar respon percepatan yang terjadi.
4. Karakteristik gaya redam untuk sistem HMERSA telah didapatkan dari hasil simulasi, yaitu 119.4 N pada kecepatan 10 km/jam, 235.1 N pada 15 km/jam, dan 388.8 N pada 20 km/jam. Semakin tinggi kecepatan kendaraan, semakin besar gaya redam yang dihasilkan.
5. Respon percepatan untuk sistem HMERSA telah didapatkan dari hasil pengujian, yaitu 0.0136 m/s<sup>2</sup> pada kecepatan 10 km/jam, 0.0268 m/s<sup>2</sup> pada 15 km/jam, dan 0.0308 m/s<sup>2</sup> pada 20 km/jam. Semakin tinggi kecepatan kendaraan, semakin besar respon percepatan yang terjadi.
6. Dayaangkitan untuk sistem HMERSA telah didapatkan dari hasil simulasi, yaitu 5.03 W pada kecepatan 10 km/jam, 10.93 W pada 15 km/jam, dan 19.07 W pada 20 km/jam.

7. Tegangan bangkitan untuk sistem HMERSA telah didapatkan dari hasil pengujian, yaitu 0.298 V pada kecepatan 10 km/jam, 0.353 V pada 15 km/jam, dan 0.407 V pada 20 km/jam. Semakin tinggi kecepatan kendaraan, semakin besar tegangan bangkitan yang dihasilkan.

## 5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

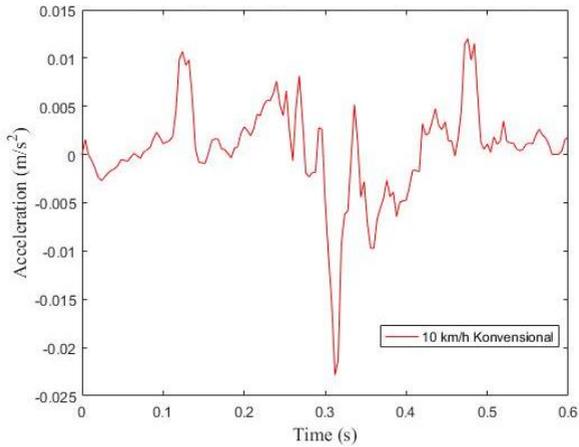
1. Mengganti sistem HMERSA dengan silinder *shock absorber* yang baru dan ukuran pipa yang lebih besar.
2. Menggunakan jenis *check valve* yang lebih cocok untuk penggunaan dengan oli suspensi.

## DAFTAR PUSTAKA

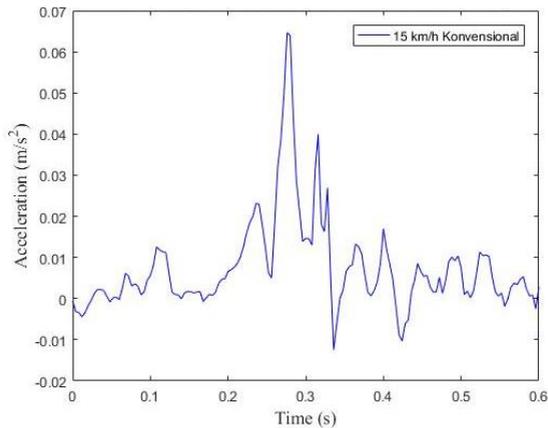
- [1] Bolton, J., 2000. **Classical Physics of Matter**. Philadelphia: Institute of Physics Publishing.
- [2] Zhang, Y., Zhang, X., Zhan, M., Guo, K., Zhao, F., Liu, Z., 2015. **Study on a Novel Hydraulic Pumping Regenerative Suspension for Vehicles**. The Franklin Institute.
- [3] Dixon, J. C., 2007. **The Shock Absorber Handbook Second Edition**. Inggris Raya: John Wiley & Sons, Ltd.
- [4] Zhang, Z., Zhang, X., Chen, W., Rasim, Y., Salman, W., Pan, H., Yuan, Y., Wang, C. **A High-efficiency Energy Regenerative Shock Absorber Using Supercapacitors for Renewable Energy Applications in Range Extended Electric Vehicle**. Elsevier.
- [5] Merlino, D., Guntur. H. L., 2016. **Pemodelan dan Analisis Pengaruh Penggunaan Hydro-Magneto-Electric Regenerative Shock Absorber (HMERSA) Dual Input-Single Output Terhadap Energi Bangkitan dan Respon Dinamis Half-Car Memanjang Kendaraan**. Surabaya: Teknik Mesin ITS.
- [6] Khetagurov, M. **Marine Auxiliary Machinery and Systems**. Moscow: Peace Publishers.
- [7] Close, C. M., Frederick, D. K., Newell, J. C., 2002. **Modelling and Analysis of Dynamic System Third Edition**. New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- [8] Pritchard, P. J., Leylegian, J. C., 2011. **Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics Eight Edition**. U.S.A: John Wiley & Sons, Ltd.

- [9] Farisah, S. N., Guntur. H. L., 2015. **Pemodelan dan Analisis Pengaruh Variasi Tekanan Awal Akumulator Terhadap Gaya Redam, Daya Listrik Bangkitan, dan Respon Dinamis pada *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HM RSA)***. Surabaya: Teknik Mesin ITS.
- [10] Huang, B., Hsieh, C. Y., Golnaraghi, F., Moallem, M., 2015. **Development and Optimization of An Energy-Regenerative Suspension System Under Stochastic Road Excitation**. Canada: Elsevier.
- [11] Xie, X. D., Wang, Q., 2015. **Energy Harvesting from A Vehicle Suspension System**. Abu Dhabi: Elsevier.
- [12] Zhang, Y., Chen, H., Guo, K., Zhang, X., Li, S. E., 2017. **Electro-Hydraulic Damper for Energy Harvesting Suspension: Modeling, Prototyping and Experimental Validation**. China: Elsevier.
- [13] Rao, S., S., 2011. **Mechanical Vibrations Fifth Edition**. New Jersey: Pearson Education Inc.

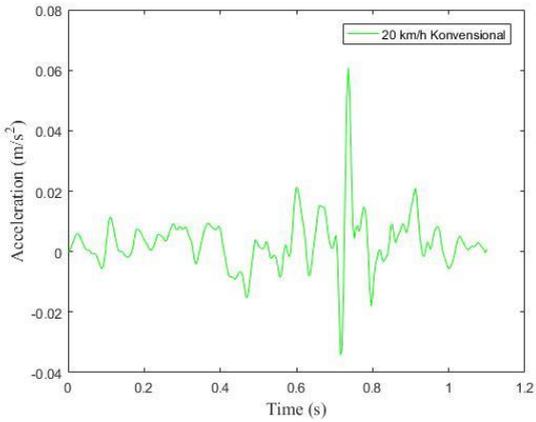
## LAMPIRAN



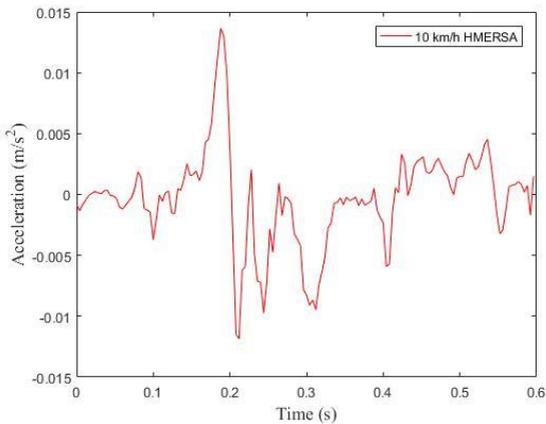
Gambar A.1 Grafik Respon Percepatan *Shock Absorber* Konvensional Terhadap Waktu pada Kecepatan 10 km/jam



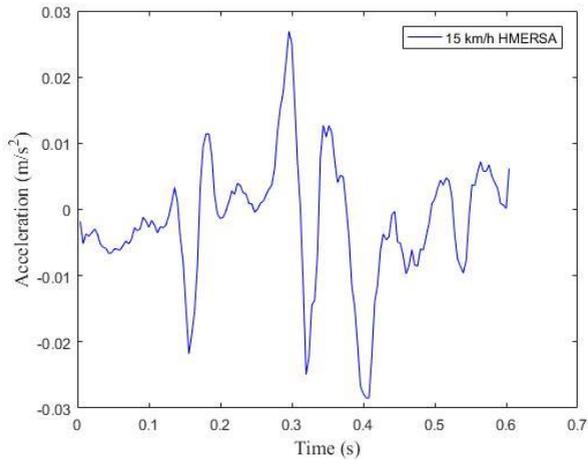
Gambar A.2 Grafik Respon Percepatan *Shock Absorber* Konvensional Terhadap Waktu pada Kecepatan 15 km/jam



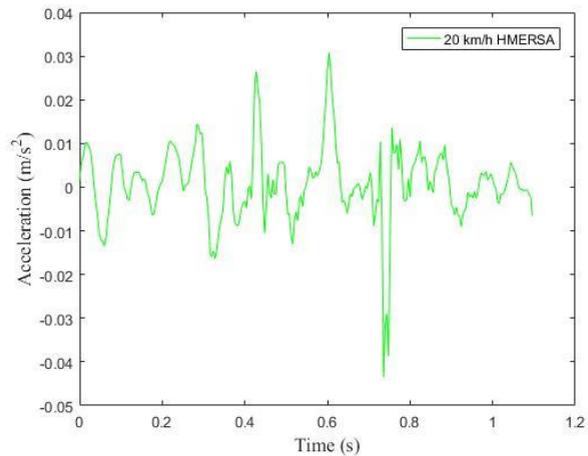
Gambar A.3 Grafik Respon Percepatan *Shock Absorber* Konvensional Terhadap Waktu pada Kecepatan 20 km/jam



Gambar A.4 Grafik Respon Percepatan HMERSA Terhadap Waktu pada Kecepatan 10 km/jam



Gambar A.5 Grafik Respon Percepatan HMERSA Terhadap Waktu pada Kecepatan 15 km/jam



Gambar A.6 Grafik Respon Percepatan HMERSA Terhadap Waktu pada Kecepatan 20 km/jam

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BIODATA PENULIS



Didi Bahari dilahirkan di Medan, 11 Maret 1995, dan merupakan anak yang terlahir dari orangtua bernama Rosman Roswijati dan Nurni Ngadiman. Riwayat pendidikan penulis diawali di TK Sutomo 1, Medan pada tahun 2000-2001. Penulis melanjutkan pendidikannya di SD Sutomo 1 Medan pada tahun 2001-2007, kemudian melanjutkan di SMP Sutomo 1 Medan pada tahun 2007-2010, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMA Sutomo 1 Medan pada tahun 2010-

2013. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 di Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Penulis juga pernah menjadi asisten Praktikum Mekanika Getaran, Praktikum Mekanika Fluida, dan juga grader pada mata kuliah Dinamika Teknik. Dalam organisasi kerohanian, penulis aktif menjadi Kepala Departemen Hubungan Luar Tim Pembina Kerohanian Buddha ITS (TPKB ITS) pada tahun 2015-2016. Kemudian pada tahun 2016-2017, penulis aktif menjadi Staff Ahli Departemen Hubungan Luar Tim Pembina Kerohanian Buddha ITS (TPKB ITS).

Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini, penulis dapat dihubungi melalui email [didibahari@yahoo.com](mailto:didibahari@yahoo.com).