



TESIS - TM142501

**PENGEMBANGAN HIDRO MAGNETO ELECTRIC
REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HMERSA)
DAN IMPLEMENTASINYA PADA KENDARAAN
ANGKUTAN BARANG**

SHULTONI MAHARDIKA
NRP 02111550050002

DOSEN PEMBIMBING
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur,ST.,M. Eng.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN DESIGN SISTEM MEKANIKAL
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



TESIS - TM142501

**HIDRO MAGNETO ELECTRIC REGENERATIVE
SHOCK ABSORBER (HMERSA) DEVELOPMENT
AND IMPLEMENTATION ON MULTY PURPOSE
VEHICLE**

SHULTONI MAHARDIKA
NRP 02111550050002

SUPERVISOR
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M. Eng.

MASTER PROGRAM
MECHANICAL SISTEM DESIGN ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2018

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:
Shultoni Mahardika
NRP. 02111550050002

Tanggal Ujian : 04 Januari 2018
Periode Wisuda : Maret 2018

Disetujui oleh:

- 
1. Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng. (Pembimbing)
NIP. 19750511199931001
 2. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D. (Penguji)
NIP. 195106051978031002
 3. Dr.Eng. Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng.Sc. (Penguji)
NIP. 197805102001121001
 4. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. (Penguji)
NIP. 197004121997032003



Dekan Fakultas Teknologi Industri

Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST., MT.
NIP. 196905071995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENGEMBANGAN HIDRO MAGNETO ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HMERSA) DAN IMPLEMENTASINYA PADA KENDARAAN ANGKUTAN BARANG

Nama mahasiswa : Shultoni Mahardika
NRP : 2115205002
Pembimbing : Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M. Eng.

ABSTRAK

Sistem suspensi merupakan merupakan bagian penting dari kendaraan. Salah satu fungsi sistem suspensi yaitu meredam getaran akibat profil jalan yang tidak rata. Perancangan sistem suspensi yang tepat, mempengaruhi atau menentukan tingkat kenyamanan sebuah kendaraan. Pada suspensi terdapat 2 komponen utama, yaitu peredam getaran (*shock absorber*) dan pegas. Fungsi pegas pada sistem suspensi adalah untuk menyerap kejutan dari permukaan jalan dan getaran roda-roda agar tidak diteruskan ke body kendaraan. Sedangkan fungsi peredam adalah meredam osilasi naik turun yang diakibatkan oleh pegas, alat ini biasa dinamakan *shock absorber*.

Dalam penelitian ini dibahas tentang pengembangan *shock absorber* konvensional menjadi *HIDRO MAGNETO ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HMERSA)*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yakni simulasi dan eksperimen. Simulasi dilakukan untuk melihat secara matematis, apakah parameter yang nantinya dibuat sebagai *part* HMERSA sudah sesuai dengan kebutuhan inputan yang diperlukan motor hidrolik dan generator untuk menghasilkan energi listrik. Sedangkan eksperimen digunakan untuk melihat seberapa besar respon energi bangkitan HMERSA saat diaplikasikan pada kendaraan angkutan barang. Eksperimen dilakukan pada sistem shock absorber bagian belakang kendaraan angkutan barang berjenis pick-up.

Hasil yang didapatkan pada penelitian ini yakni, pada hasil simulasi *half-car* sistem HMERSA dengan input sinusoidal, daya bangkitan terbesar berada pada beda fase 0° yakni sebesar 91,94 watt. Sedangkan pada implementasi sistem HMERSA di kendaraan angkut, diperoleh karakteristik, daya bangkitan akan semakin besar jika kecepatan kendaraan bertambah saat melewati bumps.

Kata kunci: Suspensi, *Regenerative* Suspensi, Gaya Redaman, *Hidro Magneto*, HMERSA

Halaman ini sengaja dikosongkan

HIDRO MAGNETO ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HMERSA) DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION ON MULTY PURPOSE VEHICLE

Student name : Shultoni Mahardika
NRP : 2115205002
Supervisor : Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M. Eng.

ABSTRACT

The suspension system is an important part of the vehicle. One function of the suspension system is to reduce vibration due to uneven road profiles. The design of the appropriate suspension system, affect or determine the comfort level of a vehicle. In the suspension there are 2 main components, namely shock absorbers (shock absorber) and springs. The function of spring in the suspension system is to absorb shock from the surface of the road and vibration of the wheels so as not to be passed to the vehicle body. While the damping function is to reduce the oscillation up and down caused by the spring, this tool is called shock absorber.

In this study discussed about the development of conventional shock absorber into HIDRO MAGNETO ELECTRIC REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HMERSA). The method used in this research is simulation and experiment. The simulation is done to see mathematically, whether the parameters that will be made as part HMERSA is in accordance with the needs of the required input hydraulic motor and generator to generate electrical energy. While the experiment is used to see how big the response of HMERSA generation energy when applied to the freight vehicle. The experiments were conducted on the shock absorber system of the rear of the pickup vehicle.

The results obtained in this study that is, on the simulation result of half-car HMERSA system with sinusoidal input, the largest power generation is at 0 ° phase difference of 91.94 watt. While in the implementation of HMERSA system in transport vehicles, characterized, the power generation will be greater if the vehicle speed increases as it passes bumps.

Keyword: Suspension, Regenerative Suspension, Damping Force, Hidro Magneto, HMERSA

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas segala karunia dan ridlo-Nya tesis dengan judul “Pengembangan Hidro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber (HMERSA) Dan Implementasinya Pada Kendaraan Angkutan Barang” ini dapat diselesaikan.

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) dalam bidang keahlian Desain Sistem Mekanikal pada Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr.Eng. Harus Laksana Guntur,ST., M.Eng., selaku dosen pembimbing yang selalu menyediakan waktu serta mengarahkan penulis dalam menyelesaikan tesis ini dengan baik.
2. Bapak Prof. I Nyoman Sutantra, M. Sc., Ph. D., Bapak Dr.Eng Unggul Wasiwitono, ST., M. Eng. Sc, dan Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT., selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak masukan dan saran pada saat seminar proposal dan seminar hasil tesis.
3. Orang tua penulis serta seluruh keluarga besar yang selalu memberikan support, do’a dan semangat selama studi hingga akhir studi.
4. Teman-teman Pascasarjana Teknik Mesin yang telah memberikan dukungan dan sarannya selama studi hingga akhir studi.

Tesis ini masih jauh dari sempurna, oleh sebab itu penulis berharap kritik dan saran yang bersifat membangun demi penulisan dimasa mendatang. Penulis juga berharap tesis ini dapat memberikan manfaat untuk penerapan teknologi kedepannya.

Surabaya, 18 Januari 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1. Studi Literatur	5
2.2. Teori Dasar	15
2.2.1. Sistem Suspensi Kendaraan	15
2.2.2. Peredam Getaran	16
2.2.3. Persamaan Pada Mekanisme Hidrolik	21
2.2.4. Motion of Base	27
2.2.5. Motor Hidrolis	28
2.2.6. Generator Listrik	29
2.2.7. Spur Gear	30
2.2.8. Accumulator	31
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1. Diagram Alir Penelitian	35
3.2. Studi Literatur	36
3.3. Survey Lapangan	36
3.4. Pemodelan <i>Conventional Shock Absorber (CSA)</i>	36

3.5. Pemodelan <i>Hidro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber</i> (HMERSA).....	39
3.6. Pemodelan matematis HMERSA dual input single output	42
3.7. Rancang Bangun dan Manufaktur HMERSA	48
3.8. Pengujian dan Pengambilan Data	48
3.9. Analisa	51

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Penentuan parameter desain <i>Hidro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber</i> (HMERSA).....	53
4.2. Simulasi respon dinamis <i>Hidro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber</i> (HMERSA) variasi beda fase	55
4.3. Simulasi respon dinamis <i>Half-Car</i> bagian belakang <i>Hidro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber</i> (HMERSA) variasi beda fase	58
4.4. Manufaktur komponen dan <i>Assembling Hidro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber</i> (HMERSA)	61
4.5. Implementasi <i>Hidro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber</i> (HMERSA) pada kendaraan angkutan barang	64
4.6. Pengambilan Data dan Pengujian HMERSA	66
4.7. Hasil dan Analisa Data HMERSA	68

BAB 5 PENUTUP

5.1. Kesimpulan	77
5.2. Saran	77

DAFTAR PUSTAKA	78
----------------------	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Prototype <i>regenerative peredam getaran</i> Zack Anderson, dkk.	6
Gambar 2.2. Sistem <i>regenerative peredam getaran</i> Zang Zutao, dkk[6].....	7
Gambar 2.3. Komponen sistem <i>regenerative peredam getaran</i> ruichen wang,dkk [7].....	8
Gambar 2.4. Parameter utama dalam sistem <i>regenerative peredam getaran</i> ruichen wang,dkk [7].....	9
Gambar 2.5. Pengukuran tegangan dan kuat arus dalam sistem <i>regenerative</i> peredam getaran ruichen wang,dkk [7].	10
Gambar 2.6. kemampuan <i>regenerative energi</i> dalam sistem <i>regenerative</i> peredam getaran ruichen wang,dkk [7].	10
Gambar 2.7. Pengukuran defleksi suspensi pada kecepatan 70 km/jam di kelas jalan C[10]	11
Gambar 2.8. Skema <i>regenerative peredam getaran</i> Skryptian[2]	13
Gambar 2.9. Skema <i>regenerative peredam getaran</i> Novian [8]	14
Gambar 2.10. Sistem suspensi kendaraan bagian belakang tipe pegas daun	15
Gambar 2.11 Diagram <i>stress-strain</i> dari sebuah massa yang mempunyai <i>material damping</i>	17
Gambar 2.12. Perbedaan tekanan akibat pengecilan luas penampang	18
Gambar 2.13. Karakteristik redaman akibat <i>orifice</i>	18
Gambar 2.14. Karakteristik redaman akibat inersia	19
Gambar 2.15. Karakteristik gaya redaman akibat beban elektrik linier	20
Gambar 2.16. Skema diagram generator 3 fasa dengan penyearah	21
Gambar 2.17. Hasil voltase keluaran generator AC	21
Gambar 2.18. Penerapan hukum Bernoulli pada sebuah pipa	22
Gambar 2. 19 Ilustrasi untuk aliran dalam suatu kontrol volume	23
Gambar 2. 20 <i>Loss coefficient</i> untuk aliran melalui perubahan <i>sudden area</i>	25
Gambar 2. 21 <i>Representative total resistance</i> (L_e/D) untuk (a) pipa belokan (<i>bend</i>) dan siku bergelang (<i>flanged elbow</i>) 90° dan (b) belokan <i>miter</i> (<i>miter</i> <i>bend</i>)	26
Gambar 2.22. Base excitation (a) Sistem fisik base excitation (b) Free body diagram untuk sistem base excitation	27

Gambar 2. 23 Model seperempat kendaraan suspensi pasif	27
Gambar 2. 24 Motor Hidrolis	29
Gambar 2. 25. Generator	29
Gambar 2. 26 <i>Compressed Gas Accumulator</i>	32
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian	35
Gambar 3.2. Model <i>Conventional Shock Absorber</i>	36
Gambar 3.3. Skema HMERSA dual input single output	39
Gambar 3.4. Desain HAMERSA	40
Gambar 3.5. Ilustrasi Pergerakan Fluida saat Kompresi	41
Gambar 3.6. Ilustrasi Pergerakan Fluida saat Ekspansi	41
Gambar 3.7. Mekanisme silinder hidrolis HMERSA	42
Gambar 3.8. Grafik Simulasi Gaya redam terhadap kecepatan	50
Gambar 3.9. Skema pengujian HMERSA	50
Gambar 3.10. Carry Futura Pick up	51
Gambar 3.11. Rencana penempatan HMERSA	51
Gambar 4.1. Aliran fluida pada HMERSA	54
Gambar 4.2. Respon gaya redam suspensi kiri (a) dan kanan (b) terhadap <i>displacement</i>	55
Gambar 4.3. Respon gaya redam suspensi kiri (a) dan kanan (b) terhadap <i>velocity</i>	56
Gambar 4.4. Grafik respon tegangan (a), arus (b), dan daya (c) yang dihasilkan	57
Gambar 4.5. Grafik respon <i>displacement</i> (a) dan <i>angular displacement</i> (b) terhadap waktu pada <i>half-car</i> bagian belakang	58
Gambar 4.6. Respon percepatan (a) dan percepatan sudut (b) terhadap waktu.	59
Gambar 4.7. Grafik respon arus (a), tegangan (b) dan daya (c) yang dihasilkan	60
Gambar 4.8. Desain HMERSA	61
Gambar 4.9. Komponen yang sudah ada di laboratoriu vibrasi	61
Gambar 4.10. (a) <i>T-Junction</i> untuk silinder hidrolis ke <i>check-valve</i> dan (b) <i>T-Junction</i> antar <i>check valve</i> ke selang hidrolis	62

Gambar 4.11. Komponen yang digunakan dalam implementasi HMERSA ...	63
Gambar 4.12. Reservoir tank yang digunakan dalam implementasi HMERSA	63
Gambar 4.13. Posisi RSA pada kendaraan angkutan barang	64
Gambar 4.14. Penempatan RSA pada kendaraan angkutan barang	64
Gambar 4.15 Posisi tabung <i>reservoir</i> pada implementasi RSA	66
Gambar 4.16. Skema pengukuran kuat arus listrik	67
Gambar 4.17. Rangkaian elektronik pengambilan data RSA	67
Gambar 4.18. Pengujian RSA dengan cara dipompa tangan	68
Gambar 4.19. Hasil pengukuran pada oscilloscope RSA dipompa tangan variasi pertama	68
Gambar 4.20. Hasil filter <i>butterworth</i> pada <i>software</i> numerik RSA dipompa tangan variasi pertama	69
Gambar 4.21. Hasil pengukuran pada oscilloscope RSA dipompa tangan variasi kedua	70
Gambar 4.22. Hasil filter <i>butterworth</i> pada <i>software</i> numerik RSA dipompa tangan variasi kedua	70
Gambar 4.25. Hasil pengukuran Oscilloscope pada kecepatan (a) 25 km/jam dan (b) 20 km/jam	70
Gambar 4.26. Hasil filter <i>butterworth</i> data tegangan RSA pada <i>software</i> numerik	73

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. <i>Power electric output</i> pada amplitudo dan frekuensi yang berbeda[9].	7
Tabel 2.2. Hasil evaluasi simulasi HESA pada semua kondisi jalan[10]	12
Tabel 2. 3 <i>Minor Loss Coefficient</i> untuk pintu masuk pada pipa	25
Tabel 2.4. <i>Loss coefficient</i> untuk kontraksi bertahap: saluran bulat dan persegi panjang	26
Tabel 2. 5. <i>Representative dimensionless equivalent lengths (L_e/D)</i> untuk katup dan <i>fitting</i>	27
Tabel 2.6. Hasil pengujian generator	30
Tabel 2.7. Karakteristik untuk tipe-tipe akumulator <i>Compressed gas</i>	31
Tabel 4.1. Nilai gaya redam pada fase yang berbeda	56
Tabel 4.2. Nilai rms tegangan, arus, dan daya bangkitan	57
Tabel 4.3. Nilai rms tegangan, arus, dan daya bangkitan <i>half-car</i>	60
Tabel 4.4. Hasil pengukuran kuat arus pompa tangan variasi ke-1	69
Tabel 4.5. Hasil pengukuran kuat arus pompa tangan variasi ke-2	71
Tabel 4.6. Hasil pengukuran kuat arus implementasi HMERSA pada kendaraan.	73

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem suspensi merupakan merupakan bagian terpenting dari kendaraan. fungsi sistem suspensi yaitu meredam getaran akibat profil jalan yang tidak rata. Perancangan system suspensi yang tepat, mempengaruhi atau menentukan tingkat kenyamanan sebuah kendaraan. Pada suspensi terdapat 2 komponen utama, yaitu peredam getaran (*shock absorber*) dan pegas.

Energi getaran yang timbul akibat profil jalan yang tidak rata, sebagian diteruskan oleh pegas ke body kendaraan lalu sebagiannya lagi diredam oleh *shock absorber* dan dibuang menjadi energi panas. Pada 10 tahun terakhir ini telah dikembangkan sebuah riset tentang *shock absorber* yang mampu mengubah energi getaran menjadi energi listrik. Teknologi tersebut dinamakan *regenerative shock absorber (RSA)* atau *regenerative suspension*.

Dalam penelitian mahasiswa dari MIT Zack Anderson [1] telah dikembangkan *regenerative shock absorber*.. Energi yang terbuang pada peredam getaran dimanfaatkan menjadi energi listrik. Dalam perkembangannya *regenerative shock absorber* juga dapat digunakan untuk memberikan daya pada perangkat lain atau mengisi ulang battery dengan menggunakan motor elektromagnetik. Pemanfaatan tersebut dilakukan oleh Skriptyan [2] menggunakan tipe suspensi *regeneratif elektromagnetik*. Penelitian tersebut menghasilkan energi bangkitan lalu diaplikasikan pada quarter car model sehingga didapatkan arus maksimal 0,8 A dan daya bangkitan maksimal 10 W. Hal ini berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Kurniawan [3] dimana menggunakan tipe suspensi regeneratif mekanik dengan desain RSA (*Regenerative Shock Absorber*) 1:5 yang dapat menghasilkan daya sebesar 4.365 W.

Lin dan Xuexun [4] dalam pengembangan RSA-nya menggunakan tipe *hydraulic electromagnetic suspension* atau lebih dikenal dengan nama *hydraulic regenerative shock absorber (HRSA)*. Sistem ini memiliki keuntungan baik dari sisi fleksibilitas sistem hidrolik serta regenerasi energinya. Struktur yang sederhana

dan tidak membutuhkan banyak komponen menjadikannya mudah untuk diaplikasikan.

Seluruh Pengembangan HRSA yang ada umumnya menggunakan satu inputan tekanan dari shock absorber. Energi yang dihasilkan inputan tersebut diaplikasikan langsung untuk memutar motor hidrolis kemudian diteruskan ke generator untuk mengetahui besarnya energi yang dibangkitkan. Pada sistem satu inputan ini terdapat beberapa kekurangan yaitu: energi yang dihasilkan kecil dan putaran pada motor hidrolis tidak terus menerus. Akibatnya, energi yang dihasilkan fluktuatif sehingga dapat merusak baterai jika diaplikasikan langsung untuk pengisian.

Dalam penelitian ini kami mengembangkan HRSA yang masih menggunakan single input single output, menjadi *hydro magneto electric regenerative shock absorber* (HMERSA) dengan dual input single output. Pada penelitian HMERSA sebelumnya, didapatkan energi bangkitan yang kurang maksimal. Sehingga kami melakukan pengkajian ulang dalam menentukan parameter dan mereduksi kehilangan tekanan pada sistem agar energi bangkitan dan performa sistem suspensinya bisa lebih baik.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini yakni:

1. Bagaimana membuat desain baru dari sistem HMERSA dual input single output?
2. Bagaimana karakteristik energi bangkitan HMERSA dual input single output?

1.3 Tujuan

Tujuan dalam penelitian ini yaitu:

1. Membuat desain baru dari sistem HMERSA dual input single output
2. Mendapatkan karakteristik energi bangkitan HMERSA dual input single output.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Parameter yang digunakan dalam pembuatan HMERSA didapatkan dari perhitungan matematis.
2. Uji eksperimen HMERSA dilakukan pada mobil angkutan barang roda empat (*pick-up*).
3. Inputan shock absorber diperoleh dari *speed bumps* pada jalan raya.
4. Analisa percepatan body kendaraan dilakukan hanya pada arah vertikal.
5. Variasi kecepatan yang diaplikasikan dalam eksperimen yaitu 15 Km/jam, 20 Km/jam, dan 25 Km/jam.
6. Pengujian dilakukan di laboratorium vibrasi Teknik Mesin ITS.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Didapatkan desain baru untuk pengembangan HMERSA dual input single output.
2. Sebagai data referensi tentang potensi energi yang dihasilkan HMERSA dual input single output.
3. Sebagai acuan pengembangan penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

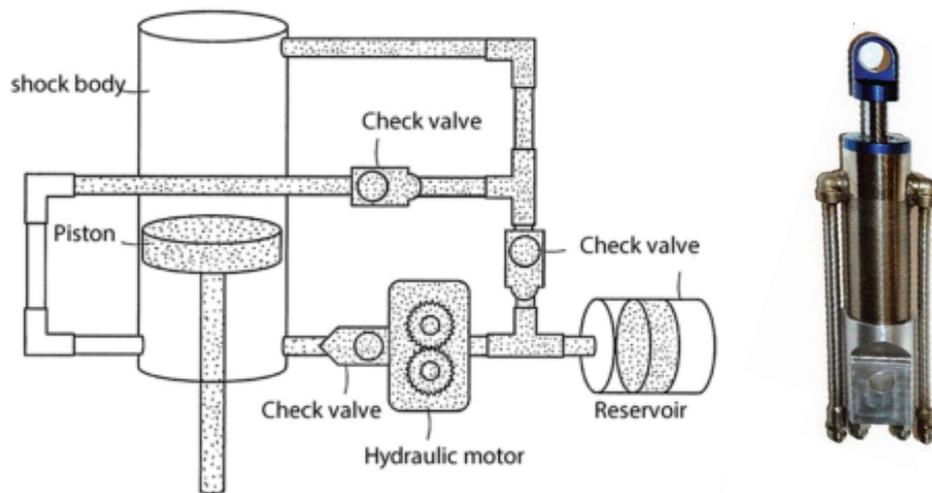
KAJIAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Suspensi merupakan salah satu komponen yang memegang peranan dalam pembatasan gaya vertikal pada kendaraan. Fungsinya untuk meningkatkan kenyamanan dan pengendalian kendaraan. Suspensi juga berfungsi menahan gaya vertikal antara *body* kendaraan dan roda yang berasal dari permukaan jalan yang tidak rata, gangguan internal yang berasal dari *dynamic roll* dan *pitch* yang melawan arah gaya, akselerasi vertikal dari body kendaraan, serta gerakan *roll* dan *pitch* beban dinamis roda [5].

Penelitian dalam pemanfaatan energi ini telah dilakukan sejak 1980-an, dan RSA merupakan cara yang dikemukakan dalam pemanfaatan energi kinetik yang hilang oleh getaran suspensi dalam peredam getaran[8]. Prinsip utama RSA yaitu mengubah gerakan bolak-balik silinder peredam hidrolis menjadi gerakan rotasi motor hidrolis dan generator dengan Fluida bertekanan. Energi tersebut kemudian disimpan dalam baterai untuk dimanfaatkan kemudian. Untuk meningkatkan efisiensi *translational* dan menyesuaikan dengan kecepatan eksitasi yang tinggi maka diperlukan transmisi untuk mengubah gerak linear menjadi gerak rotasi.

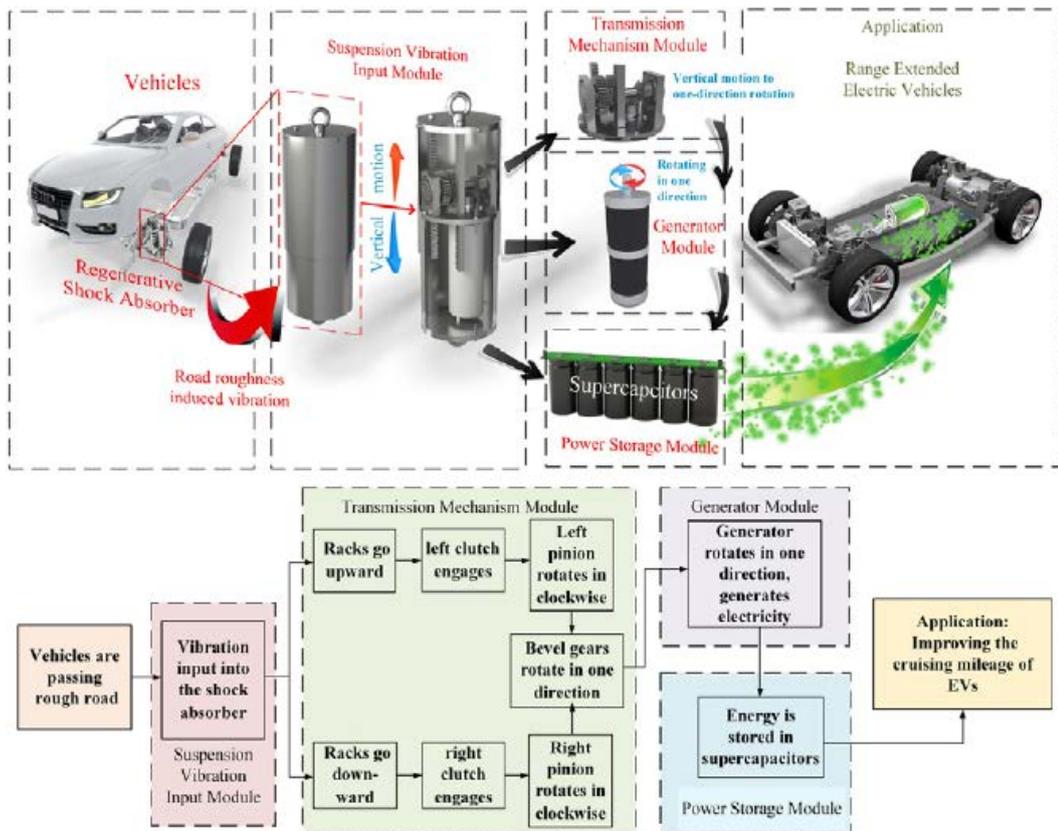
Zack anderson, dkk dari MIT memanfaatkan energi yang terjadi pada peredam getaran karena adanya *bumps* dijalanan, energi yang timbul akibat tekanan tersebut dirubah menjadi energi listrik, sehingga peredam getaran lebih efektif daripada yang konvensional[1]. Prototype yang dibuat zack (gambar 2.1) menggunakan system hidrolis dimana tekanannya digunakan untuk memutar motor hidrolis yang terhubung ke generator. Sistem ini dikontrol oleh sistem elektronik aktif untuk mengoptimalkan *damping*, memberikan kenyamanan berkendara daripada *shock conventional*, serta menghasilkan energi listrik untuk mengisi ulang baterai maupun peralatan listrik lainnya.



Gambar 2.1. Prototype *regenerative peredam getaran* Zack Anderson, dkk.

Pada proses pengujianya, penelitian yang dilakukan Zack menemukan bahwa pada 6 peredam getaran truk besar, masing-masing peredam getaran bisa menghasilkan energi rata-rata 1Kw pada jalan standar. Besarnya *regenerative energi* ini tergantung dari massa kendaraan, dimana massa truck dan kendaraan militer lebih besar dibandingkan mobil konvensional. Dalam pengendalian *damping*, prototype ini bergantung pada sistem elektronik aktif, sehingga jika sistem tersebut rusak maka energi yang dihasilkan tidak dapat dimanfaatkan.

Zang Zutao, dkk [6] dalam penelitiannya pun mengemukakan bahwa energi yang dihasilkan dari *regenerative shock absorber* mampu untuk memanfaatkan energi terbuang yang ada dalam sistem suspensi kendaraan. Dalam penelitiannya, peredam getaran yang terdiri dari 4 komponen utama, yakni Modul input getaran suspensi, modul transmisi, modul generator dan modul penyimpanan energi (gambar 2.2). Modul input getaran suspensi digunakan untuk mendapatkan gerak relatif linier, sedangkan modul mekanisme transmisi untuk mengkonversi gerak linear naik turun menjadi gerak rotasi yang searah dengan poros input generator. Generator diarahkan ke satu arah untuk menghasilkan energi listrik dan mengkonversi energi kinetik menjadi energi listrik.



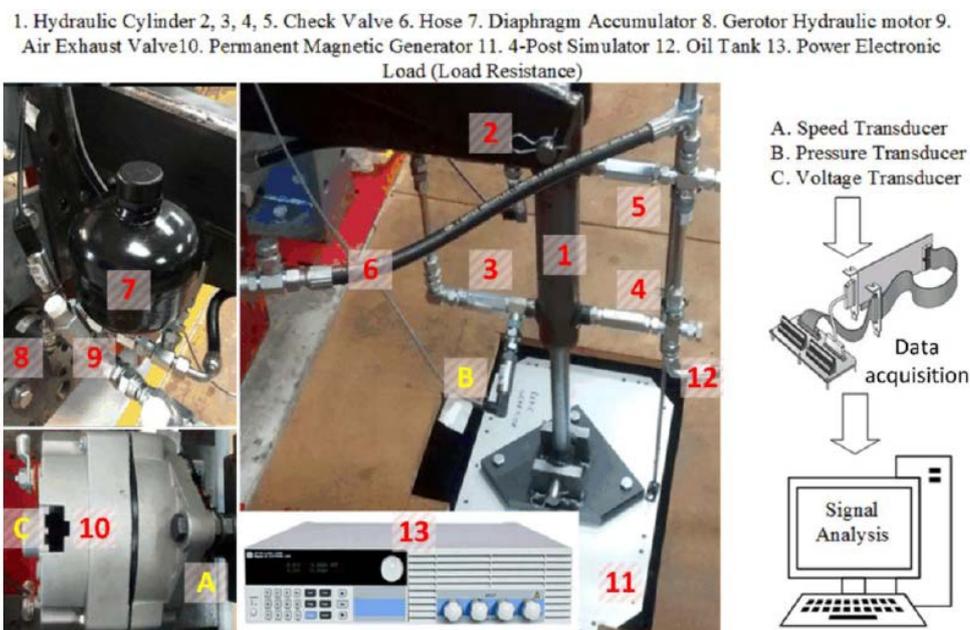
Gambar 2.2. Sistem *regenerative peredam getaran* Zang Zutao, dkk[6].

Dalam penelitian ini didapatkan karakteristik damping dari mobil penumpang. Pengukuran ini dilakukan pada 3 amplitudo yang bervariasi seperti dalam tabel 2.1. Pada tabel tersebut menunjukkan bahwa energi *regenerative* terbesar didapat pada amplitudo 7,5 mm dengan frekuensi getaran 2,5 Hz yakni sebesar 4,302 watt. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar amplitudo dan frekuensi getaran maka energi *regenerative* yang dihasilkan akan semakin besar. Variable redaman dapat dihasilkan dengan mengubah beban external sehingga dapat diterapkan pada berbagai jenis kendaraan.

Tabel 2.1. *Power electric output* pada amplitudo dan frekuensi yang berbeda[9].

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

Peredam getaran konvensional menggunakan fluida sebagai bahan untuk membuang energi panas yang dihasilkan dari eksitasi antara kontur jalan dengan body kendaraan agar getaran yang terjadi menjadi lebih halus. Pada saat terjadi eksitasi tersebut peredam getaran mengalami tekanan. Tekanan tersebut dapat dimanfaatkan sebagai *energi regenerative* seperti yang dilakukan Ruichen wang, dkk [7]. Dalam penelitiannya Ruichen wang mempertimbangkan efek aliran katup, variasi modulus bulk cairan, *acumulator smoothing*, pengaruh fitur generator, dan kehilangan energi pada motor. Model ini memvalidasi eksitasi yang berbeda dan resistansi beban pada berbagai variasi model jalan (gambar 2.3).



Gambar 2.3. Komponen sistem regenerative peredam getaran ruichen wang, dkk [7].

Untuk menguji variasi tekan tekanan dan memperkirakan aliran dalam sistem, lima *pressure transducers* ditempatkan dalam sistem seperti pada gambar 2.4. Hal ini berfungsi untuk mengukur tekanan di *cap end chamber*, *rod end chamber line pressure* masing-masing sebelum dan sesudah motor hidrolis. LVDT transducer digunakan untuk mengukur *displacement piston*. Sebuah *shaft encoder* digunakan untuk mengukur kecepatan motor. Selain itu digunakan pula sensor tegangan dan kuat arus untuk mengukur output listrik yang digunakan oleh resistor 10Ω . Pada penelitian ini, simulasi dan eksperimennya berada pada kondisi yang sama yakni dengan input sinusoidal dengan perbedaan amplitudo serta frekuensi.

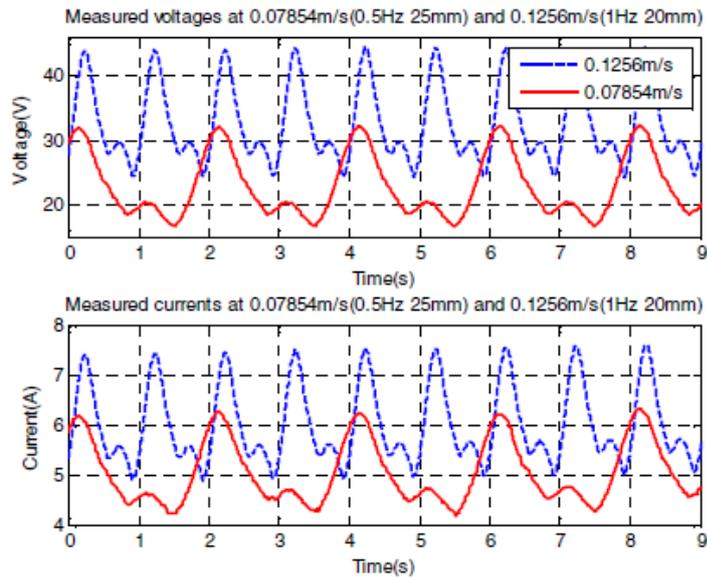
Dua input yang digunakan adalah 0.07854 m/s pada 0.5Hz, (25mm stroke) dan 0.1256 m/s pada 1Hz (20mm stroke). Sistem ini menggunakan *check valve pada absorber* untuk memperoleh aliran satu arah. Parameter yang digunakan dapat dilihat pada gambar 2.4.

Dalam experimennya masih terdapat sedikit udara yang terjebak dalam silinder dan sirkuit hidrolis, yakni berupa gelembung udara yang menyebabkan berkurangnya *reliability* oli hidrolis dan *bulk modulus* yang efektif. Gelembung udara juga memungkinkan terjadinya bunyi yang tidak terduga serta kejut yang akan mengurangi umur pakai silinder. Pemakaian *air exhaust valve* digunakan untuk meminimalkan rongga udara dan gelembung udara dalam sistem hidrolis. *Oil tank* juga digunakan untuk mengimbangi oli pada saat aliran balik. Viskositas dinamis oli yang rendah pada saat bekerja direduksi untuk menghilangkan kehilangan tekanan ketika oli mengalir dalam sistem.

Komponen	Spesifikasi		
	<i>Komponen dalam pengujian</i>		
Silinder	$S_{max} = 200\text{mm}$	$D_{bore} = 50\text{mm}$	$D_{rod} = 30\text{mm}$
Akumulator	$P_{pc} = 20\text{bar}$	$V_{pc} = 0.16\text{L}$	1/2'
Motor	$D_m = 8.2\text{cc}$	Kecepatan nominal = 2450 rpm	$D_h = 16\text{mm}$
Generator	Output DC, sudah dilengkapi rectifier	2,33 Fase Medan Magnet	$D_g = 17\text{mm}$
Check valve	3/8' BSPP	Tekanan Max = 350 bar	$P_{cr} = \pm 0.4/0.7$
Selang	$D_{pipe} = 3/8'$	Tekanan Max = 800 bar	
4-poster actuator	Max. velocity = 1.9m/s		

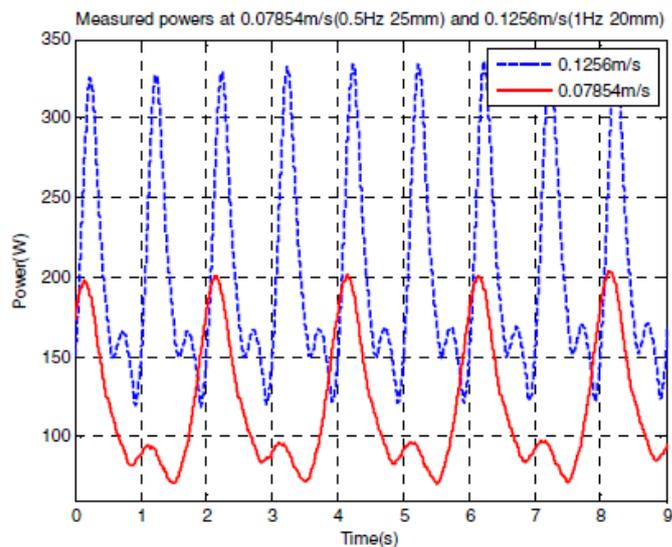
Gambar 2.4. Parameter utama dalam sistem regenerative peredam getaran ruichen wang, dkk [7].

Hasil yang didapatkan bisa dilihat pada gambar 2.5. Rata-rata tegangan yang dihasilkan 22.8V dan 32.7V, kuat arus 5.05A dan 6.03A pada frekuensi 0.5Hz dan 1Hz. Tegangan output yang terjadi tergantung pada kecepatan angker generator dan medan arusnya. Semakin tinggi kecepatan angker dan medan arusnya, maka semakin kuat gaya gerak listrik yang diinduksi untuk menghasilkan listrik.



Gambar 2.5. Pengukuran tegangan dan kuat arus dalam sistem regenerative peredam getaran ruichen wang,dkk [7].

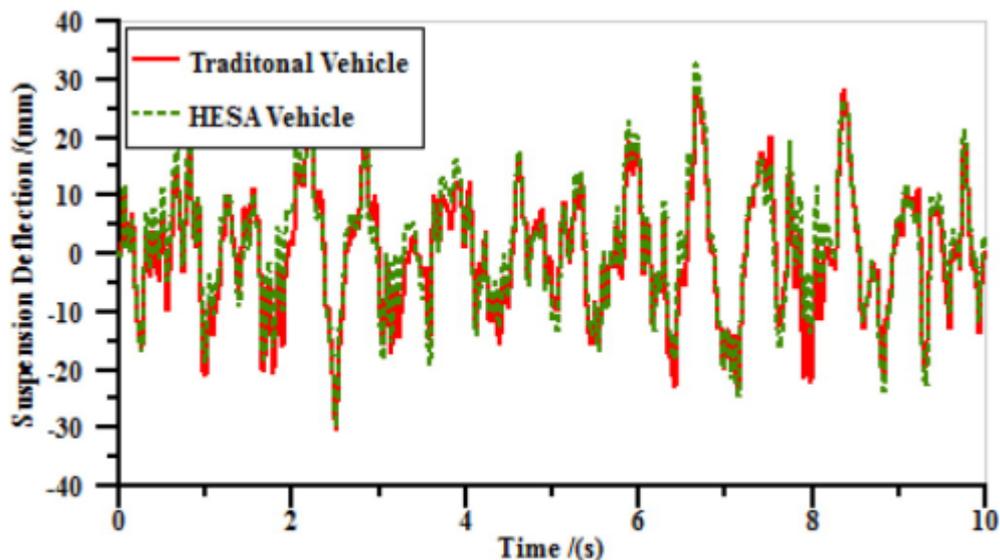
Kemampuan energi yang dapat dibangkitkan dalam penelitian ruichen wang,dkk., seperti terlihat pada gambar 2.6. Bahwa kemampuan *regenerative* yang diperoleh rata-rata output dayanya untuk 0.07854 m/s dan 0.1256 m/s yakni sebesar 118.2 watt dan 201.7 watt dengan rata-rata input daya mesin 440 watt dan 1091 watt, sehingga efisiensi sistem konversi energinya sebesar 26,86% dan 18,49%.



Gambar 2.6. kemampuan regenerative energi dalam sistem *regenerative peredam getaran* ruichen wang,dkk [7].

Peng Min, dkk[10] melakukan pendekatan berbeda pada regenerative peredam getaran yang dia buat. Dia mensimulasikan permodelan untuk melihat seberapa besar energi regenerative yang dihasilkan lalu membandingkannya dengan suspensi absorber *traditional*. Hal ini dilakukan untuk melihat tingkat kenyamanan kendaraan dan energi *regenerative* yang dihasilkan. Hasil yang dicapai seperti terlihat dalam table 2.2. Bahwa energi yang dapat dibangkitkan sebesar 41,72 watt untuk kecepatan 30 km/jam pada kondisi jalan kelas B. Energi yang tertinggi didapatkan pada kecepatan 70 km/jam pada kondisi jalan kelas C yakni sebesar 339,88 watt.

Perubahan daya ini mempunyai hubungan positif dengan kecepatan kendaraan dan kelas jalan. Kinerja HESA ini mempunyai nilai yang dekat dengan *peredam getaran traditional*, hal ini bisa dilihat juga dalam table 2.2 dan gambar 2.7. Defleksi pada peredam getaran *traditional* dan HESA tidak terpaut terlalu jauh. Pada kecepatan kendaraan tertinggi 70 km/h didapatkan defleksi tertinggi HESA 10,83 mm sedangkan peredam getaran tradisional 10,74 mm, sehingga tingkat kenyamanan dari peredam getaran ini mendekati kenyamanan dari peredam getaran tradisional.



Gambar 2.7. Pengukuran defleksi suspensi pada kecepatan 70 km/jam di kelas jalan C[10].

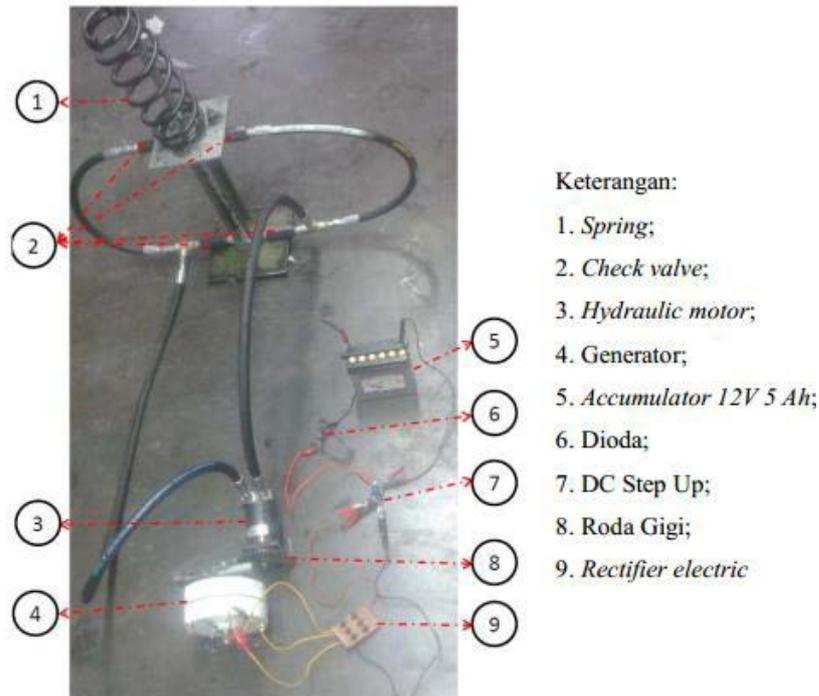
Tabel 2.2. Hasil evaluasi simulasi HESA pada semua kondisi jalan[10].

Kondisi Simulasi		Akselerasi Vertikal (m.s ²)	Gaya Ban (N)	Defleksi suspensi (mm)	Energi bangkitan (W)
HESA	30 km/h Class B	0.73	18096	5.91	41.72
	50 km/h Class B	0.92	18132	5.76	80.13
	70 km/h Class B	1.05	18168	5.99	117.60
	30 km/h Class C	1.34	18259	7.39	195.72
	50 km/h Class C	1.70	18408	9.30	279.28
	70 km/h Class C	1.99	18550	10.83	339.88
Peredam konvensional	30 km/h Class B	0.63	18092	3.59	
	50 km/h Class B	0.81	18126	4.60	
	70 km/h Class B	0.95	18159	5.37	
	30 km/h Class C	1.26	18244	7.19	
	50 km/h Class C	1.62	18379	9.20	
	70 km/h Class C	1.91	18512	10.74	

Penelitian tentang *regenerative shock absorber* dengan memanfaatkan tekanan fluida juga dilakukan oleh Skriptyan[2]. Skriptyan menitikberatkan penelitiannya pada karakteristik gaya redam dan energi *regenerative* melalui mekanisme alat yang dia buat. Pada gambar 2.8 terlihat skema *regenerative shock absorber* yang dia kembangkan. Pengembangan yang dia lakukan adalah dengan merubah skema serta menambah *check valves* agar motor hidrolis berputar searah. Hal ini dilakukan untuk mengurangi *losses energi* akibat putaran yang tidak searah. Selain itu dia juga merubah generator yang diaplikasikan pada sistem ini, yakni menggunakan generator PMG-100 dengan motor hidrolis tipe BMM 8. Perbandingan roda gigi yang dia gunakan 1:2.65, dengan diameter masing-masing roda gigi 115.6 mm pada motor hidrolis dan 43.6 mm pada generator.

Untuk mengetahui karakteristik dari *regenerative shock absorber* miliknya, terlebih dahulu dia melakukan permodelan serta simulasi dengan beberapa variasi. Variasi tersebut yakni rasio diameter silinder dengan *orifice*, *gear ratio*, penggunaan *accumaulator*, viskositas oli, SOC aki dan daya generator. Hasilnya terdapat empat perbedaan tekanan gaya redam yang dihasilkan oleh perbedaan luas penampang silinder hidrolis dan *check valves*. Semakin besar putaran generator maka akan menghasilkan arus, tegangan dan daya *regenerative*

yang besar pula. Validasi yang dilakukan dengan cara menguji *prototype* pada *quarter car suspension rig* yang kemudian mensimulasikan karakteristik dinamis dan daya listrik *regenerative* sebelum dan sesudah diaplikasikan pada model seperempat kendaraan.

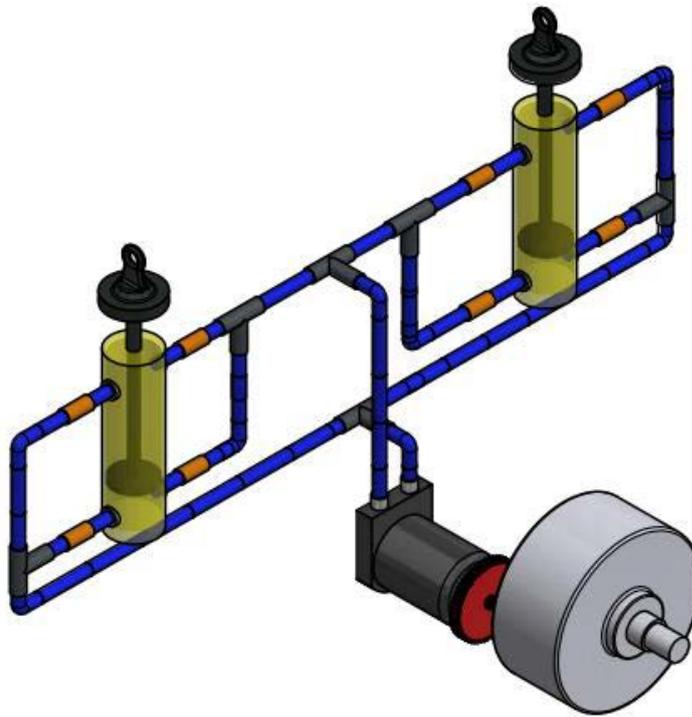


Gambar 2.8. Skema *regenerative peredam getaran* Skryptian[2].

Studi tentang pengaruh perubahan tekanan accumulator terhadap karakteristik redaman dan energi listrik juga dianalisa pada penelitian ini. Tekanan accumulator hanya mempengaruhi redaman mekanik, tetapi energi listrik *regenerativenya* turun. Semakin besar tekanan *accumulator* maka semakin besar pula gaya redam yang dihasilkan. Efisiensi tertinggi didapatkan ketika tidak menggunakan *accumulator*. Hal ini terjadi karena semakin tinggi kecepatan, redaman mekanik seperti inersia, redaman akibat luas penampang silinder dengan *check valve*, dan *head loss* pada sistem perpipaan juga semakin meningkat. Sehingga daya listrik yang didapatkan serta daya mekaniknya menjadi semakin menurun. Dalam pengujiannya, dapat diketahui energi *regenerative* yang dihasilkan yakni pada frekuensi 1.3 Hz, 1.5 Hz, dan 1.7 Hz berturut-turut adalah 1.017 W, 1.745 W, dan 2.332 W.

Dari keseluruhan penelitian tersebut masih menggunakan satu peredam getaran dengan satu output yang dimanfaatkan untuk *regenerative* listrik. Penelitian yang menggunakan dual peredam getaran single output dilakukan oleh Novian[8].

Peneletiannya menggabungkan dua peredam getaran menjadi satu sistem inputan ke motor hidrolis yang memutar *spur gear*. Putaran tersebut kemudian diteruskan ke generator untuk menghasilkan *regenerative* energi listrik. Skema yang diterapkan oleh Ovin dapat dilihat pada gambar 2.9.



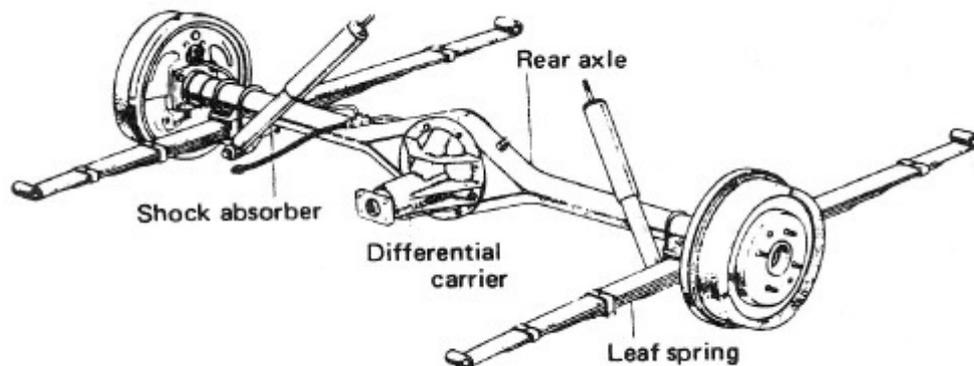
Gambar 2.9. Skema *regenerative peredam getaran* Novian [8].

Novian melakukan pengujian experimentalnya pada jalan paving dan polisi tidur. Pada jalan paving, hasil energi *regeneraive* yang dihasilkan 1.32 watt tanpa beban aki, sedangkan dengan beban aki mendapatkan hasil 0.06 watt. Pada polisi tidur dengan tinggi 4 cm dapat dihasilkan energi *regenerative* sebesar 2.47 watt tanpa beban aki dan 0.15 watt dengan beban aki. Hasil yang dicapai Novian lebih kecil daripada skryptian dengan beban aki, sehingga perlu dilakukan analisa kembali terhadap penyebab kecilnya energi yang dihasilkan. Berdasarkan studi literatur yang sudah dilakukan penyebabnya adalah besarnya *mechanical losses* dan adanya udara terjebak dalam sistem hidrolis. Akibatnya tekanan pada motor hidrolis menjadi kecil. Penelitian yang saya lakukan nantinya adalah mengurangi hal tersebut agar dicapai hasil energi *regenerative* yang maksimal.

2.2 Teori Dasar

2.2.1 Sistem Suspensi Kendaraan

Suspensi adalah kumpulan komponen tertentu yang berfungsi meredam kejutan serta getaran yang terjadi pada kendaraan akibat permukaan jalan yang tidak rata. Suspensi juga dapat meningkatkan kenyamanan berkendara dan pengendalian kendaraan. Sistem suspensi kendaraan terletak di antara bodi (kerangka) dengan roda. Terdapat dua komponen dalam sistem suspensi, yakni pegas dan peredam getaran. Pegas (spring) mempunyai fungsi untuk menyerap kejutan yang diterima dari jalan dan getaran pada roda-roda agar tidak sampai ke bodi kendaraan. Pegas juga mempunyai fungsi untuk meningkatkan kemampuan cangkaman roda terhadap jalan. Peredam kejut (peredam getaran) mempunyai fungsi untuk meredam atau melawan oskilasi (gerak naik turun) yang disebabkan pegas saat menyerap kejutan dari permukaan jalan. Contoh dari sistem suspensi kendaraan dapat dilihat pada gambar 2.10.



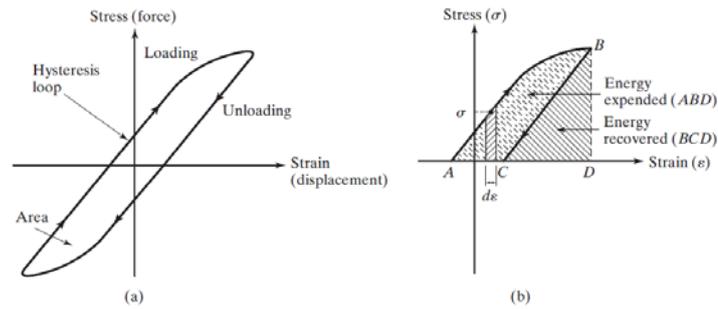
Gambar 2.10. Sistem suspensi kendaraan bagian belakang tipe pegas daun.

Penelitian yang saya lakukan merupakan pengembangan dari konsep yang ada, yakni dengan memanfaatkan tekanan hidrolis yang diperoleh dari input kondisi permukaan jalan. Energi tersebut digunakan untuk memutar motor hidrolis yang dihubungkan ke generator dengan menggunakan *spur gear*. Hasil yang diharapkan yakni pemanfaatan gerakan naik turun tersebut untuk menjadi energi *regenerative* yang dapat menghasilkan energi listrik. Penelitian ini dilakukan pada suspensi roda belakang bertipe pegas daun dengan menggunakan mobil suzuki futura 1.05.

2.2.2 Peredam Getaran

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

- ***Viscous Damping*** merupakan mekanisme redaman yang paling sering digunakan dalam analisa getaran. Saat sistem mekanis bergetar dalam media fluida (seperti udara, gas, air, atau oli), perlawanan dari fluida terhadap sistem inilah yang menyebabkan energi terdisipasi. Jumlah energi yang terdisipasi bergantung beberapa factor, yaitu bentuk dan ukuran massa yang bergetar, viskositas fluida, frekuensi getaran, dan kecepatan massa tersebut bergetar. Dalam *viscous damping*, gaya redam sebanding dengan kecepatan massa bergetar. Contoh dari *viscous damping*: (1)film cairan antara permukaan geser, (2)aliran cairan di sekitar piston di dalam silinder, (3)aliran fluida melalui lubang (*orifice*), dan (4)film cairan di sekitar sebuah jurnal di bantalan (*bearing*).
- ***Coulomb or Dry-Friction Damping***. Gaya redam besarnya konstan tetapi berlawanan arah dengan gerak massa yang bergetar. Hal ini disebabkan oleh gesekan antara menggosok permukaan yang baik kering atau pelumasan cukup.
- ***Material or Solid or Hysteretic Damping***. Ketika material berdeformasi, energi akan diserap dan terdisipasi oleh material. Hal ini disebabkan karena gesekan antara bagian dalam yang slip atau bergeser karena deformasi. Saat sebuah massa yang mempunyai *material damping* bergetar, diagram *stress-strain* ada pada gambar 2.11. Daerah yang ditunjukkan pada gambar, menunjukkan energi yang hilang tiap unit volume massa per cycle karena redaman yang terjadi.



Gambar 2. 11 Diagram *stress-strain* dari sebuah massa yang mempunyai *material damping*.

Redaman yang dihasilkan oleh sistem regenerative suspensi hidrolis dibagi menjadi dua, yakni redaman akibat pengaruh mekanik dan elektrik.

1) Redaman Mekanik

Redaman jenis ini dihasilkan dari perbedaan tekanan yang ada pada pengecilan luas penampang, *head loss major*, dan *head loss minor* pada sistem serta penambahan *accumulator* dan efek inersia pada motor hidrolis.

a) Perbedaan tekanan pada *orifice* dan *head loss*

Perbedaan tekanan pada *orifice* dan *head loss* didapatkan dari menurunkan rumus bernouli sebagai berikut:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + h_l$$

$$\frac{(P_1 - P_2)}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2}$$

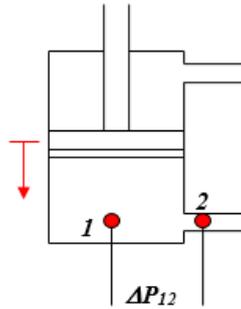
$$\Delta P_{12} = \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right) v_1^2 \quad (2.1)$$

dimana P adalah tekanan, v dalah kecepatan fluida, g adalah percepatan gravitasi dan z adalah jarak dari datum, ρ adalah massa jenis dan h_l adalah head loss. Sedangkan subcript 1 dan 2 merupakan posisi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12. Head loss dapat terjadi karena gesekan dengan dinding pipa, perubahan komponen sistem perpipaan pada bagian antar saluran, *valve* maupun *flow reducer*. Perbedaan tekanan akibat *head loss* dapat dirumuskan sebagai berikut.

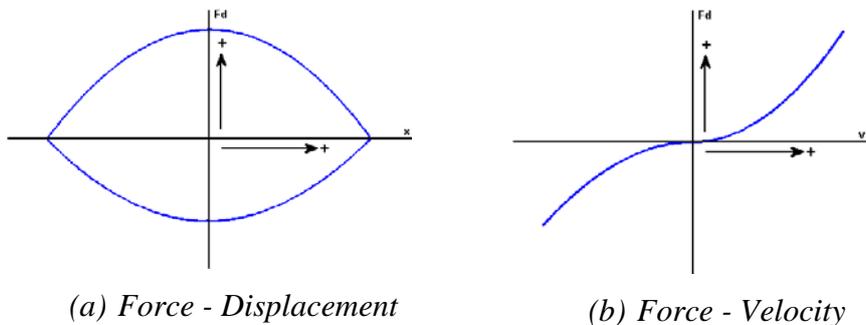
$$\frac{P_{p1}}{\rho} + \frac{v_{p1}^2}{2} + gz_{p1} = \frac{P_{p2}}{\rho} + \frac{v_{p2}^2}{2} + gz_{p2} + h_l$$

$$\frac{(P_{p1} - P_{p2})}{\rho} = h_l = \frac{64 L v_p^2}{Re D_p} - k \frac{v_p^2}{2}$$

$$\Delta P_p = \rho \left(32\mu \frac{L v_p}{\rho D_p^2} + k \frac{v_p^2}{2} \right) \quad (2.2)$$



Gambar 2.12. Perbedaan tekanan akibat pengecilan luas penampang dimana μ adalah viskositas kinematik fluida, k adalah konstanta berdasarkan perubahan bentuk pipa, L adalah panjang pipa, v_p adalah kecepatan aliran fluida pada pipa, dan D_p adalah diameter pipa. Efek redaman yang dihasilkan akibat *orifice* dan *head loss* mempunyai karakteristik seperti *peredam getarankonvensional*. Gambar 2.13 menunjukkan karakteristik redaman yang dihasilkan akibat *orifice*.



Gambar 2.13. Karakteristik redaman akibat *orifice*

- b) Perbedaan tekanan motor hidrolis akibat gaya inersia

Kecepatan putaran dan torsi keluaran motor hidrolisnya sebagai berikut:

$$\omega = \frac{Q_{mh}}{q} \eta_v \quad (2.3)$$

$$T_{mh} = \Delta P_{mh} \cdot q \cdot \eta_m \quad (2.4)$$

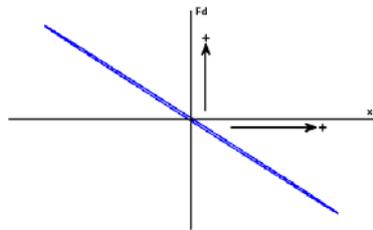
dimana Q_{mh} adalah *flow rate*, η_v adalah efisiensi volumetrik, η_m adalah efisiensi mekanis, T_{mh} adalah torsi output, dan q adalah *displacement* motor hidrolik. Torsi dirumuskan sebagai berikut.

$$T = J \cdot \omega \quad (2.5)$$

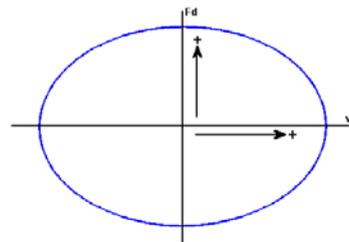
dimana J adalah momen inersia, dan ω adalah percepatan motor hidrolik. Substitusi persamaan (2.3), (2.4), dan (2.5), didapatkan.

$$\Delta P_{mh} = \frac{J \cdot \eta_v}{\eta_m \cdot q^2} \dot{Q}_{mh} \quad (2.6)$$

Dari persamaan (2.6), \dot{Q}_{mh} merupakan *flow rate* persatuan waktu. Gaya redam yang dihasilkan akibat inersia tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14.



3.1. Force - Displacement



3.2. Force - Velocity

Gambar 2.14. Karakteristik redaman akibat inersia

2) Redaman Elektrik

Redaman elektrik didapatkan dari torsi elektrik pada saat motor hidrolis memutar generator yang terdapat beban listrik. Rumusnya adalah sebagai berikut:

$$T_e = 2 \cdot N \cdot B \cdot l \cdot a \cdot I = K_t \cdot I \quad (2.7)$$

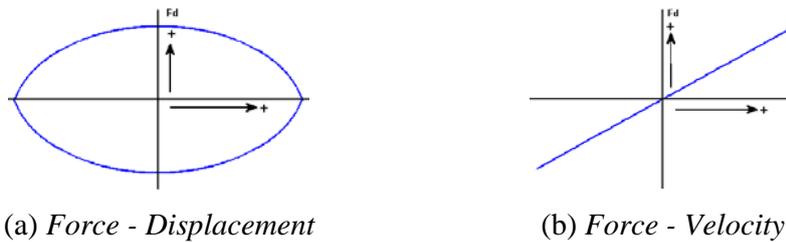
dimana N adalah jumlah lilitan kumparan, B adalah *flux density*, l adalah panjang kumparan, a adalah radius kumparan, kt adalah konstanta voltase (V/rpm), dan I adalah kuat arus. Dari persamaan tersebut, dapat dilihat bahwa torsi elektrik bekerja ketika ada beban listrik. Ketika tidak ada beban listrik ($I = 0$), maka tidak ada torsi elektrik. Dari hukum *voltase Kirchoff*, dengan nilai induktansi diabaikan, didapatkan persamaan untuk arus (I) sebagai berikut.

$$I = \frac{k_m}{(R_{in} + R_{ex})} \omega \quad (2.8)$$

Dengan hubungan $Te = Tmh$, persamaan (2.3), (2.4), (2.5) dan (2.6) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta P_{mh} = \frac{k_t \cdot k_m \cdot \eta_v}{(R_{in} + R_{ex}) \eta_m \cdot q^2} Q_{mh} \quad (2.9)$$

Karakteristik gaya redam yang dihasilkan oleh redaman elektrik tergantung pada karakteristik beban elektriknya. Untuk beban elektrik yang linier, maka karakteristik gaya redam yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Karakteristik gaya redaman akibat beban elektrik linier

3) Daya Regenerasi

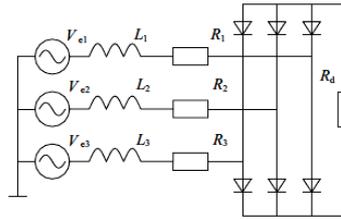
Daya *regenerative* yang dihasilkan pada sistem HM RSA didapatkan dari generator AC 3 fasa pada gambar 2.16. Li dkk [9] memodelkan generator 3 fasa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14, dimana V_{e1} , V_{e2} , dan V_{e3} mendenotasikan *electromotive force* pada 3 fasa, L_1 , L_2 , dan L_3 adalah induktansi pada setiap fasa yang mempunyai nilai sama, R_1 , R_2 , dan R_3 adalah hambatan internal generator, dan R_d adalah hambatan eksternal. V_{e1} , V_{e2} , dan V_{e3} tersebut mempunyai nilai maksimal yang sama, tetapi hanya berbeda fasa. *Electromotive force* tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\begin{aligned} V_{e1}(t) &= E_m \sin(\omega t) \\ V_{e2}(t) &= E_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ V_{e3}(t) &= E_m \sin(\omega t + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (2.10)$$

dimana ω adalah kecepatan angular generator, dan E_m adalah *electromotive voltage* yang dirumuskan,

$$E_m = 2 \cdot N \cdot B \cdot l \cdot \omega = k_m \cdot \omega \quad (2.11)$$

dimana k_m adalah konstanta *electromotive voltage*.

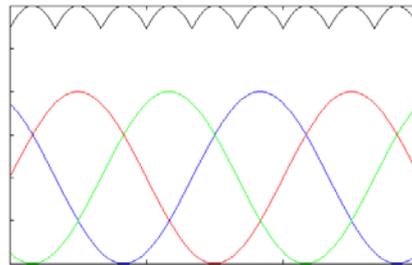


Gambar 2.16. Skema diagram generator 3 fasa dengan penyearah

Dengan menggunakan hukum voltase Kirchoff, didapatkan persamaan untuk 3 fasa sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 V_{e1}(t) - L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - i_1 \cdot R_1 - i_1 \cdot R_d &= 0 \\
 V_{e2}(t) - L_1 \frac{di_2(t)}{dt} - i_2 \cdot R_2 - i_2 \cdot R_d &= 0 \\
 V_{e3}(t) - L_1 \frac{di_3(t)}{dt} - i_3 \cdot R_3 - i_3 \cdot R_d &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

dimana *subscript* 1, 2, dan 3 menunjukkan fasa. Gambar 2.17 menunjukkan voltase yang dihasilkan oleh generator AC 3 fasa dan disearahkan menjadi DC. Generator 3 fasa biasanya mempunyai banyak *pole*. Sehingga *ripple voltage* yang terjadi akibat *rectifier* tidak terlihat pada alat avometer. Oleh karena itu, persamaan 3 fasa tersebut dapat disederhanakan menjadi 1 DOF.



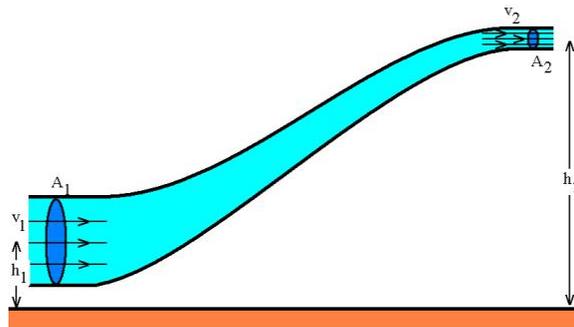
Gambar 2.17. Hasil voltase keluaran generator AC (— *phase* 1; — *phase* 2; — *phase* 3; — Hasil *rectifier*/DC)

2.2.3 Persamaan Pada Mekanisme Hidrolik

2.2.3.1. Persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli menyatakan bahwa jumlah energi pada suatu titik di dalam suatu aliran tertutup sama besarnya dengan jumlah energi di titik lain pada jalur aliran yang sama. Penerapan hukum bernoulli pada sebuah aliran digambarkan pada gambar 2.18.

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):



Gambar 2.18. Penerapan hukum Bernoulli pada sebuah pipa

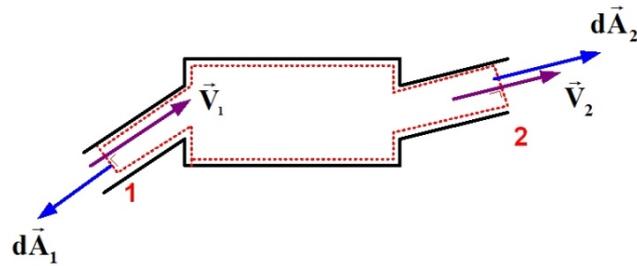
Persamaan Bernoulli:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 \quad (2.13)$$

dimana p_1 adalah tekanan fluida pada kondisi 1 (N/m^2), p_2 adalah Tekanan fluida pada kondisi 2 (N/m^2), v_1 adalah Kecepatan aliran fluida pada kondisi 1 (m/s), v_2 adalah Kecepatan aliran fluida pada kondisi 2 (m/s), h_1 adalah Tinggi pipa kondisi 1 (m), h_2 adalah Tinggi pipa kondisi 2 (m), dan g adalah gravitasi bumi ($9.8 m/s^2$)

2.2.3.2. Konservasi Massa pada Mekanika Fluida

Hukum konservasi massa menyatakan massa dari suatu sistem tertutup akan tetap meskipun terjadi berbagai macam proses di dalam sistem tersebut. Jika zat cair atau gas mengalir masuk dan keluar sebuah volume kontrol melalui pipa atau saluran, massa yang masuk adalah proporsional terhadap luas permukaan A dari pipa atau saluran, densitas dan kecepatan dari fluida. Ilustrasi kontrol volume aliran ini digambarkan pada gambar 2.19.



Gambar 2. 19 Ilustrasi untuk aliran dalam suatu kontrol volume

$$\left(\frac{dM}{dt}\right)_{system} = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.15)$$

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

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

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

$$\int_{CS} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.16)$$

Dimana ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3), V adalah volume fluida (m^3) \vec{V} adalah kecepatan aliran fluida (m/s) dan A adalah luas area saluran (m^2).

2.2.3.3. Head Loss

Head loss merupakan kerugian energi per satuan berat fluida dalam aliran cairan dalam sistem perpipaan. *Total head loss* merupakan penjumlahan dari *major* dan *minor head loss*.

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

$$h_l = \left(\frac{64}{Re}\right) \frac{L}{2d_{tube}} \dot{x}^2 \quad (2.17)$$

$$\text{dengan } Re = \frac{d_{tube}}{v} \dot{x} \quad (2.18)$$

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:

$$h_l = \frac{32Lv}{d_{tube}^2} \dot{x} \quad (2.19)$$

dimana h_l adalah *major head loss*, L adalah panjang pipa (m), d_{tube} adalah diameter pipa (m), \dot{x} adalah kecepatan aliran (m/s), Re adalah *Reynold number*, dan ν adalah viskositas kinematik fluida (m²/s).

Nilai friction factor dipengaruhi oleh nilai Reynold number (Re) (persamaan (2.17)) dan kekasaran permukaan pipa (e). 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 kerugian energi yang diakibatkan karena pintu masuk, fitting, perubahan luasan, dsb. Rumu untuk *minor head loss*^[12]:

$$h_{lm} = K \frac{\dot{x}^2}{2} \quad (2.20)$$

dimana h_{lm} adalah *minor head loss* dan K adalah *loss coefficient*.

Berikut ini adalah penjelasan tentang fenomena yang dapat menimbulkan *minor head loss*:

➤ *Inlets dan Exits*

Jika terdapat ujung tajam pada sudut inlet, maka akan terjadi separasi aliran yang menimbulkan *vena contracta*, yang menyebabkan hilangnya *mechanical energi*. Sekalipun sudut pada *inlet* maupun *exit* di buat bulat (*rounded*), tetap terjadi fenomena *vena contracta* yang kecil. Dari tabel 2.3 dapat dilihat besarnya koefisien head loss minor pada beberapa bentuk *inlet/exit*.

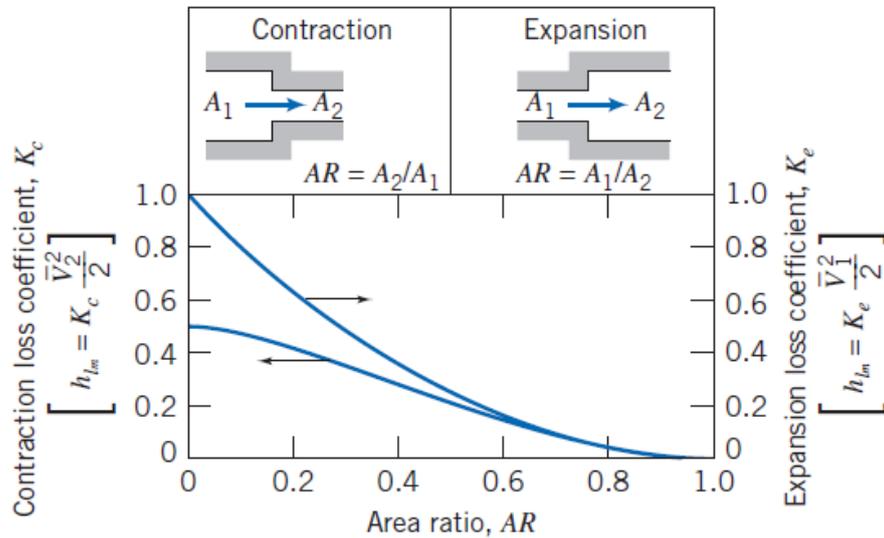
Tabel 2. 3 *Minor Loss Coefficient* untuk pintu masuk pada pipa

Entrance Type	Minor Loss Coefficient, K^a								
Reentrant	0.78								
Square-edged	0.5								
Rounded	<table border="1"> <thead> <tr> <th>r/D</th> <th>0.02</th> <th>0.06</th> <th>≥ 0.15</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>K</td> <td>0.28</td> <td>0.15</td> <td>0.04</td> </tr> </tbody> </table>	r/D	0.02	0.06	≥ 0.15	K	0.28	0.15	0.04
r/D	0.02	0.06	≥ 0.15						
K	0.28	0.15	0.04						

^aBased on $h_m = K(\bar{V}^2/2)$, where \bar{V} is the mean velocity in the pipe.

➤ *Enlargements dan Contractions*

Losses ini terjadi karena adanya perubahan area penampang (membesar ataupun mengecil) secara tiba – tiba. Untuk mengetahui besarnya koefisien headloss minor, dapat dilihat pada gambar 2.20.

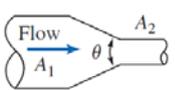


Gambar 2. 20 *Loss coefficient* untuk aliran melalui perubahan *sudden area*

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

table 2.4 dapat ditentukan besarnya sudut dari diffuser maupun *nozzle* yang dibutuhkan.

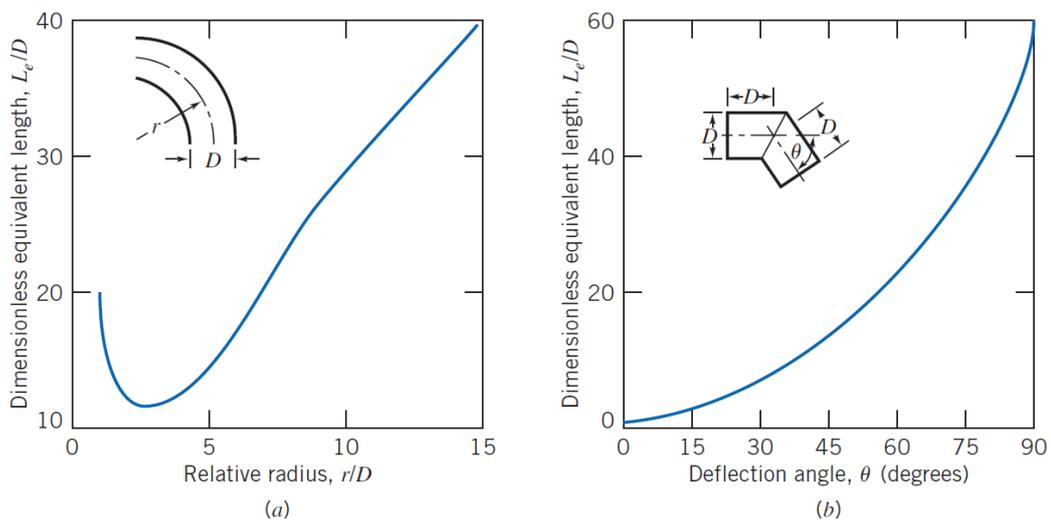
Tabel 2.4. *Loss coefficient* untuk kontraksi bertahap: saluran bulat dan persegi panjang

	A_2/A_1	Included Angle, θ , Degrees						
		10	15–40	50–60	90	120	150	180
	0.50	0.05	0.05	0.06	0.12	0.18	0.24	0.26
	0.25	0.05	0.04	0.07	0.17	0.27	0.35	0.41
	0.10	0.05	0.05	0.08	0.19	0.29	0.37	0.43

Note: Coefficients are based on $h_{L_c} = K(V_2^2/2)$.

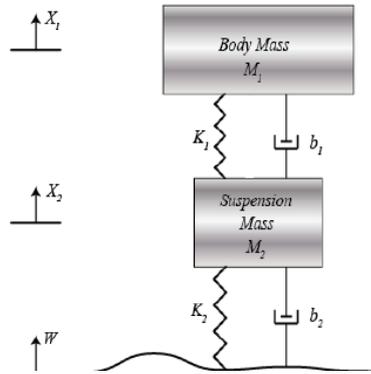
➤ *Pipe bend* (belokan)

Head loss akibat bending (belokan) pada pipa mempunyai nilai yang lebih besar dari pada *head loss* yang terjadi pada aliran *fully developed* pada pipa lurus pada panjang yang sama. Pada gambar 2.21 dan tabel 2.5 dapat ditentukan besar L_e/D yang digunakan untuk menghitung besarnya *head loss* minor yang terjadi.



Gambar 2.21. *Representative total resistance* (L_e/D) untuk (a) pipa belokan (*bend*) dan siku bergelang (*flanged elbow*) 90° dan (b) belokan *miter* (*miter bend*)

Perancangan system suspensi model seperempat kendaraan (salah satu dari empat roda) digunakan untuk penyederhanan masalah, model ini menggunakan sistem pegas-peredam. Pada gambar 2.23 merupakan sistem suspensi pasif.



Gambar 2. 23 Model seperempat kendaraan suspensi pasif.

Persamaan gerak dari gambar 2.16 :

$$M_1 \ddot{x}_1 = -b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) \quad (2. 23)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 = b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) + b_2(\dot{W} - \dot{x}_2) + k_2(W - x_2) \quad (2. 24)$$

Kemudian dari persamaan tersebut, diubah menjadi bentuk *state variable equation*.

$$\dot{x}_1 = v_1$$

$$\dot{x}_2 = v_2$$

$$\dot{W} = w$$

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{M_1} [-b_1(v_1 - v_2) - k_1(x_1 - x_2)] \quad (2. 25)$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{M_2} [b_1(v_1 - v_2) + k_1(x_1 - x_2) + b_2(w - v_2) + k_2(W - x_2)] \quad (2. 26)$$

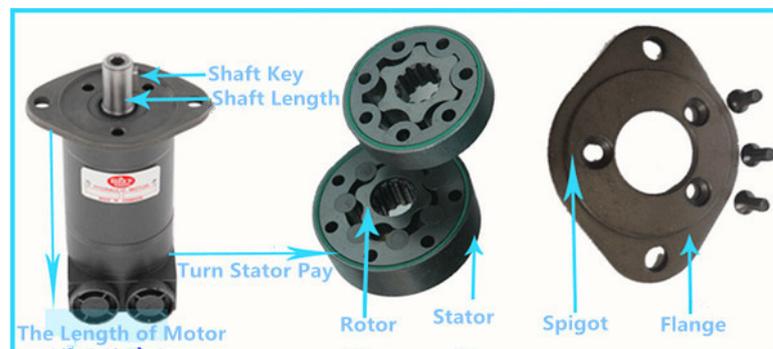
2.2.5 Motor Hidrolis

Fungsi motor hidrolis yaitu merubah tekanan pada sistem hidrolis menjadi torsi dan angular displacement. Motor hidrolis yang dipakai di penelitian ini seperti pada gambar 2.26 yang merupakan jenis gerator, yang terdiri dari dua rotor. Dimana satu roda gigi berputar pada roda gigi yang lain dengan sumbu putar berbeda. Cara kerjanya yaitu fluida yang bertekanan masuk ke inlet motor hidrolis yang kemudian

memutar ruda giginya sehingga timbul perbedaan tekanan yang menciptakan putaran pada sumbu gigi *driven*. Nilai displacement motor hidrolis ini sebesar 8,2 cc/rev, artinya untuk bisa melakukan satu putaran memerlukan oli hidrolis sebesar 8,2 cc. Torsi yang dihasilkan motor hidrolis adalah

$$T_{mh} = \frac{P \cdot d}{2 \cdot \pi} \quad (2.31)$$

dimana T_{mh} adalah Torsi Motor Hidrolik (N.m), P adalah Pressure (N/m²), dan d adalah Displacement motor (m³/Rev).



Gambar 2.24. Motor Hidrolis

2.2.6 Generator Listrik

Generator listrik adalah alat yang mengubah energi mekanik berupa putaran menjadi energi listrik. Generaor listrik menginduksi gaya gerak listrik (GGL) atau EMFdengan memutar kumparan dalam medan magnet. Putaran yang dimanfaatkan berasal dari putaran mesin maupun turbin. Generator yang saya gunakan merupakan generator magnet permanen arus bolak-balik (AC) dengan tipe seri NE-100 yang ditunjukkan pada Gambar 2.27. Spesifikasi generator ini mampu menghasilkan daya 100 watt dengan tegangan 12/24 volt yang memiliki kecepatan 600 RPM.



Gambar 2.25. Generator

Pada penelitian Skryptian[2] dan Novian [8] juga menggunakan jenis generator yang sama seperti pada penelitian ini. Pada tabel 2.6 adalah hasil pengujian karakteristik generator yang dilakukan Skryptian. Untuk meningkatkan nilai tegangan yang keluar digunakan modul DC Step Up, hal ini dilakukan karena berhubungan dengan tegangan yang dibutuhkan untuk mengisi battery 12 volt. Pada tabel tersebut dapat dilihat bahwa pada kecepatan putar 36 rpm, generator menghasilkan 0,35 volt dan pada kecepatan putar 130 rpm menghasilkan 2,46 volt. Untuk bisa melakukan pengisian battery maka diperlukan kecepatan 130 rpm dengan bantuan modul DC Step Up untuk merubah tegangan Output menjadi 12 volt.

Tabel 2.6. Hasil pengujian generator

SOC	RPM	V _{L-L}	V _{DC}	V _{Step Up}	I	SOC	RPM	V _{L-L}	V _{DC}	V _{Step Up}	I
SOC 25%	36	0.9	0.35	0.15	0	SOC 75%	36	0.9	0.35	0.15	0
	55	1.2	0.8	0.2	0		55	1.2	0.8	0.2	0
	75	1.6	1.37	1.3	0		75	1.6	1.37	1.3	0
	105	2.1	2.36	2.12	0		105	2.1	2.36	2.12	0
	130	2.3	2.46	12.27	0		130	2.3	2.46	12.27	0
	185	3.8	2.74	12.46	0.09		185	3.7	2.79	13.28	0.12
	250	5.4	3.1	12.66	0.21		250	5	3.11	13.38	0.28
	370	8	3.69	13.04	0.59		370	7.2	3.75	13.5	0.56
630	13.9	7.13	14.07	1.7	630	12.9	7.45	13.92	2.17		
SOC 50%	36	0.9	0.35	0.15	0	SOC 100%	36	0.9	0.35	0.15	0
	55	1.2	0.8	0.2	0		55	1.2	0.8	0.2	0
	75	1.6	1.37	1.3	0		75	1.6	1.37	1.3	0
	105	2.1	2.36	2.12	0		105	2.1	2.36	2.12	0
	130	2.3	2.46	12.27	0		130	2.3	2.46	12.27	0
	185	3.8	2.8	12.59	0.12		185	3.6	2.77	13.58	0.11
	250	5	3	12.93	0.29		250	5.1	3.05	13.67	0.25
	370	7.2	3.7	13.5	0.57		370	7.4	3.73	13.8	0.49
630	11.9	7.68	15.3	1.97	630	13	7.16	14.3	1.84		

2.2.7 Spur Gear

Pada penelitian ini bertujuan menghasilkan energi listrik dari putaran generator. Putaran generator dihasilkan dari putaran motor hidrolis, sehingga untuk meneruskan putaran dari motor hidrolis ke generator kita membutuhkan *spur gear*. Pada penelitian ini gear dengan diameter besar terhubung dengan motor hidrolis sedangkan gear dengan diameter lebih kecil terhubung ke generator. Gear yang besar memiliki diameter 115 mm sedangkan yang kecil 45 mm dengan perbandingan ratio 1:2,6. Hal ini berarti jika motor hidrolis berputar dengan kecepatan 100 rpm, maka generator akan berputar dengan kecepatan 260 rpm. Nilai ratio ini digunakan juga untuk mendapatkan nilai kecepatan putar yang dibutuhkan generator sehingga menghasilkan tegangan untuk pengisian battery.

2.2.8 Accumulator

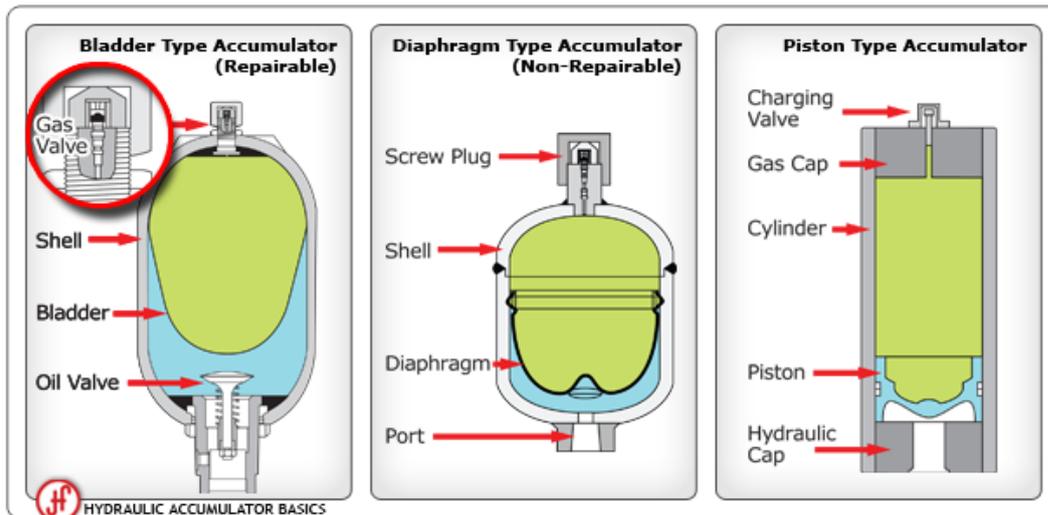
Accumulator merupakan sebuah tipe dari alat penyimpan energi, dan pada saat tertentu juga akan berfungsi sebagai reservoir sementara yang bisa menyerap beban kejut dari suatu sistem hidrolik. Fungsi dari *accumulator* ini untuk menyimpan energi dengan cara kerja energi yang diserap akan dilepaskan lagi ketika tekanan pompa melemah sehingga kerja yang dihasilkan selalu konstan, hal ini menyebabkan tekanan dalam sistem dapat dipertahankan, selain itu *accumulator* juga berfungsi mengkompensasi tekanan saat terjadi kebocoran. Dimana saat terjadi kebocoran, maka tekanan oli dalam sistem hidrolik akan turun dan *accumulator* akan menggantikan/menambah tekanan oli sehingga kerja sistem hidrolik tetap normal untuk sementara waktu.

Tipe-tipe pada akumulator yakni *Tower, Raised weight, Compressed gas (bladder, diaphragm, piston, metal bellow)Spring*. Pada penelitian ini akan digunakan akumulator Diafragma tipe *Compressed gas*. Karakteristik tipe *accumulator compressed gas* ditunjukkan tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Karakteristik untuk tipe-tipe akumulator *Compressed gas*.

	Diaphragm accu. Welded	Diaphragm accu. screwed	Bladder accumulator	Piston accumulator
Size [l]	0.2 – 4	0.1 – 10	0.2 – 450	0.5 – 2500
Max.pressure [bar]	250 (350)	750	1000	1000
Flow rate[l/s]	< 150	< 150	< 140	< 400
Max pressure ratio	1 : (6...8)	1 : 10	1 : 4	1 : ∞∞
Cost per volume [€/l]	Sangat rendah	Rendah hingga mendekati rata-rata	Rendah hingga tinggi (tergantung pada ukuran akumulator)	Rata-rata hingga tinggi
Response characteristic	Sangat bagus	Sangat bagus	Sangat bagus	Bagus
Cocok untuk	sistem suspensi, denyut redaman (<i>pulsation damping</i>).	akumulator dengan ukuran kecil dan sedang dengan tekanan operasi yang tinggi.	mengimbangi puncak daya, tetapi juga denyut redaman dalam sistem volume besar	Rasio tekanan dan laju aliran yang tinggi, misalnya, untuk peralatan crash test

Tipe akumulator diafragma yang dipilih karena biasa digunakan dalam suspensi hydropneumatic, tipe ini terdiri dari dua sekat yang berbeda yang dipisahkan oleh sebuah membran. Pada saat tekanan oli tinggi, maka membran tersebut akan tertekan. Tipe-tipe akumulator *compressed gas* ditunjukkan pada gambar 2.29.



Gambar 2.26. *Compressed Gas Accumulator*

Akumulator dapat digunakan pada beberapa situasi, diantaranya:

- ***Emergency and safety:*** akumulator terus menerus berada di bawah tekanan saat terjadi kegagalan daya listrik karena dapat memberikan aliran dan tekanan untuk melakukan fungsi tambahan atau menyelesaikan siklus mesin.
- ***Shock or pulsation damping:*** akumulator dapat digunakan untuk meredam lonjakan tekanan dari ujung *sudden valve*, denyutan dari pompa atau reaksi beban dari *sudden movement*, bagian yang terhubung ke silinder hidrolis.
- ***Leakage compensation:*** akumulator dapat digunakan untuk dapat digunakan untuk mempertahankan tekanan dan mengganti cairan yang hilang akibat kebocoran internal pada komponen sistem termasuk silinder dan katup.
- ***Thermal expansion:*** akumulator dapat menyerap perbedaan tekanan yang disebabkan oleh variasi suhu dalam sistem hidrolis tertutup.

Persamaan yang digunakan untuk akumulator hidrolis:

– Sebagai *spring*

$$p = p_0 \left[\frac{V_0}{V_0 - (A_{\text{relatif}})x} \right]^n \quad (2.32)$$

– Sebagai *damper*

$$p = p_0 \quad (2.33)$$

dimana p adalah tekanan pada akumulator, p_0 adalah tekanan awal pada akumulator, V_0 adalah volume awal pada akumulator, x adalah perpindahan dari piston pada silinder hidrolis, n adalah *polytrophic gas index*, dan A_{relatif} adalah luas pada silinder hidrolis, dimana saat kompresi ($A = \text{luasan ruang rod piston} - \text{luasan ruang permukaan piston}$) dan sebaliknya untuk ekspansi.

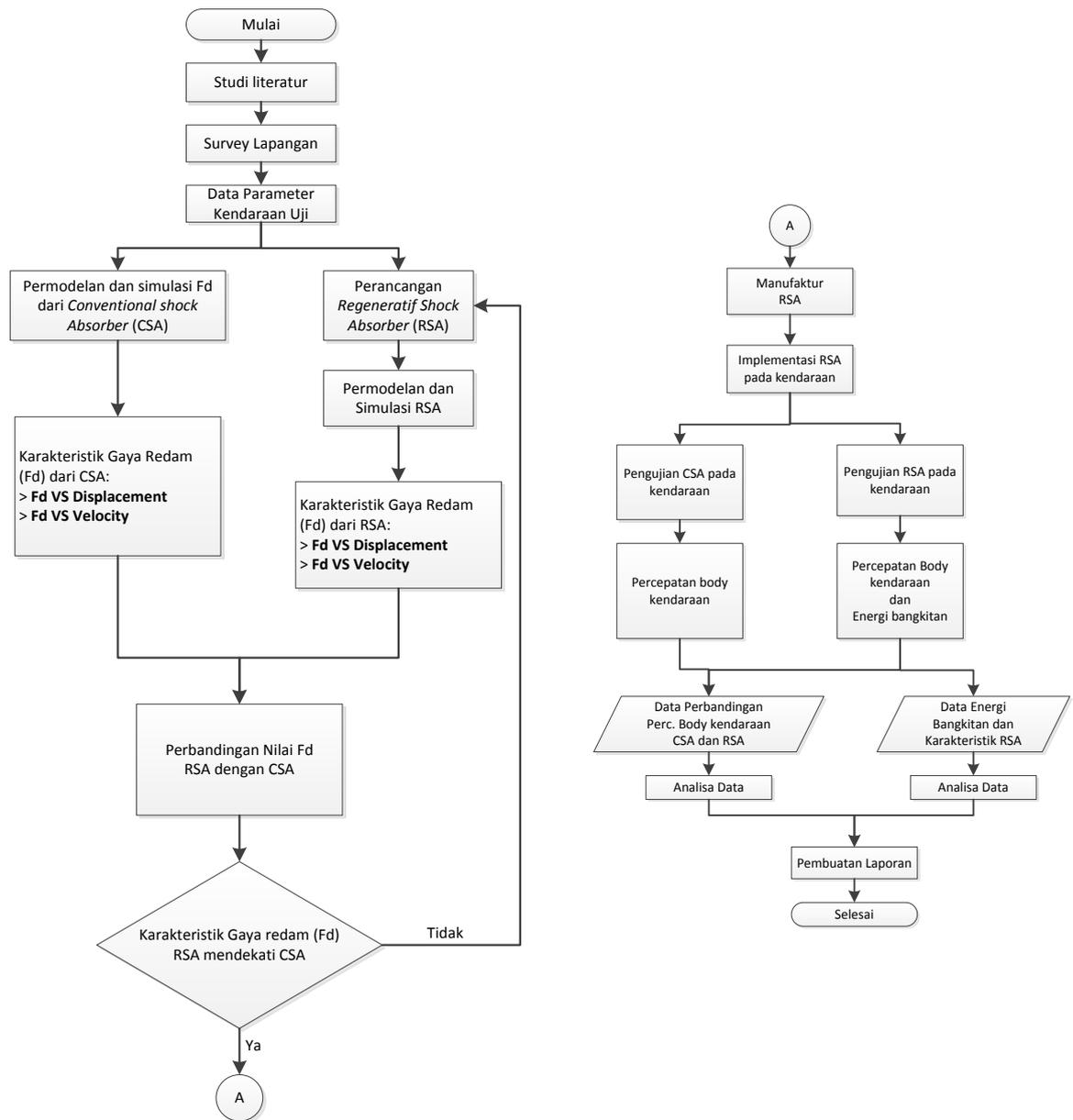
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir penelitian

Penelitian dan pengembangan *regenerative shock absorber* dibuat dengan sistem tekanan hidrolis yang berasal dari 2 input absorber dengan 1 output ke motor hidrolis. Diagram alir penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.2. Studi Literatur

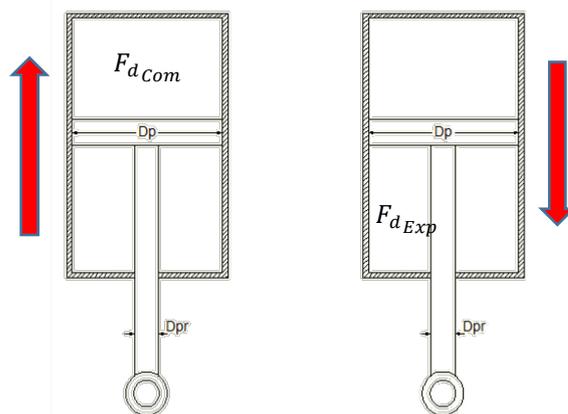
Pada tahapan ini, dilakukan *review* literatur penelitian yang sudah ada untuk merumuskan masalah dan menemukan solusi dari masalah yang timbul pada penelitian sebelumnya, sehingga dapat dicapai hasil yang maksimal.

3.3. Survey Lapangan

Pada tahapan ini, dilakukan *survey* pada kondisi real kendaraan dan shock absorber. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan parameter yang tepat dalam melakukan perancangan dan simulasi awal. Sehingga diharapkan desain yang dilakukan sudah mendekati kondisi real untuk implementasi sistem.

3.4. Pemodelan *Conventional Shock Absorber (CSA)*

Sistem suspensi *hydraulic shock absorber* menggunakan mekanisme hidrolis dengan fluida kerja oli. Fluida tersebut berfungsi sebagai damper untuk menghasilkan gaya redam (F_d) pada saat proses ekspansi dan kompresi. Model *conventional shock absorber* terdapat pada gambar 3.2. Dari gambar tersebut dapat diketahui $F_{d_{Com}}$ adalah gaya redam yang terjadi pada area kompresi, $F_{d_{Exp}}$ adalah gaya redam yang terjadi pada area ekspansi, D_p adalah diameter piston dan D_{pr} adalah diameter *piston rod*.



Gambar 3.2. Model *Conventional Shock Absorber*

3.3.1. Pemodelan Matematis *Conventional Shock Absorber (CSA)*

Besarnya gaya redam yang dihasilkan saat proses kompresi maupun ekspansi dirumuskan sebagai berikut :

Hukum Pascal

$$F = \Delta P \times A \quad (4.1)$$

Dalam hal ini ΔP didapatkan dari persamaan Bernoulli yang menyatakan bahwa jumlah energi pada suatu titik dalam suatu aliran tertutup sama besarnya dengan jumlah energi di titik yang lain pada aliran yang sama, sehingga:

$$P_o + \frac{1}{2}\rho V_o^2 + \rho g h_o = P_p + \frac{1}{2}\rho V_p^2 + \rho g h_p \quad (4.2)$$

Pada kasus ini $h_o = h_p$, dan g dianggap sama, sehingga persamaan tersebut menjadi:

$$\begin{aligned} \frac{P_o}{\rho} + \frac{V_o^2}{2} &= \frac{P_p}{\rho} + \frac{V_p^2}{2} \\ \frac{P_p - P_o}{\rho} &= \frac{V_o^2 - V_p^2}{2} \\ \Delta P &= \frac{\rho}{2} (V_o^2 - V_p^2) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Oli sebagai fluida kerja diasumsikan sebagai *incompressible fluid*, maka dengan hukum konservasi massa didapatkan persamaan:

Kompresi

$$\begin{aligned} A_p \cdot V_p &= A_{ok} \cdot V_{ok} \\ V_{ok} &= \frac{A_p}{A_{ok}} V_p \end{aligned} \quad (4.4)$$

Ekspansi

$$\begin{aligned} (A_p - A_{pr}) \cdot V_p &= A_{oe} \cdot V_{oe} \\ V_{oe} &= \frac{(A_p - A_{pr})}{A_{oe}} V_p \end{aligned} \quad (4.5)$$

dimana,

$$A_p = \frac{1}{4}\pi D^2 \quad (4.6)$$

$$A_{oe} = A_{ok} = \frac{1}{4}\pi d_o \quad (4.7)$$

Perbedaan tekanan pada saat kompresi didapat dengan mensubstitusikan persamaan (4.4) ke (4.3) sehingga didapatkan rumus sebagai berikut :

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} (V_{ok}^2 - V_p^2)$$

$$\begin{aligned}
\Delta P &= \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_p}{A_{ok}} V_p \right)^2 - V_p^2 \right) \\
\Delta P &= \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_p}{\frac{1}{4}\pi d_o} \right)^2 - 1 \right) V_p^2 \\
\Delta P &= \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_p}{\frac{1}{4}\pi d_o} \right)^2 - 1 \right) \dot{x}^2
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Perbedaan tekanan pada saat ekspansi didapat dengan mensubstitusikan persamaan (4.5) ke (4.3) sehingga didapatkan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
\Delta P &= \frac{\rho}{2} (V_{0e}^2 - V_p^2) \\
\Delta P &= \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_p - A_{pr}}{\frac{1}{4}\pi d_o} \right)^2 - 1 \right) \dot{x}^2
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Persamaan gaya redam saat kompresi didapat dari substitusi persamaan (4.8) ke persamaan (4.1), sehingga didapat gaya redam saat kompresi sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
F_D &= \Delta P \times A_k \\
F_D &= \frac{\rho}{2} (V_{0k}^2 - V_p^2) A_k \\
F_D &= \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_p}{\frac{1}{4}\pi d_o} \right)^2 - 1 \right) A_p \cdot V_p^2 \\
F_D &= \frac{\rho}{2} A_p \left(\left(\frac{A_p}{\frac{1}{4}\pi d_o} \right)^2 - 1 \right) \dot{x}^2
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Persamaan gaya redam saat ekspansi didapat dari substitusi persamaan (4.9) ke persamaan (4.1), sehingga didapat gaya redam saat ekspansi sebagai berikut :

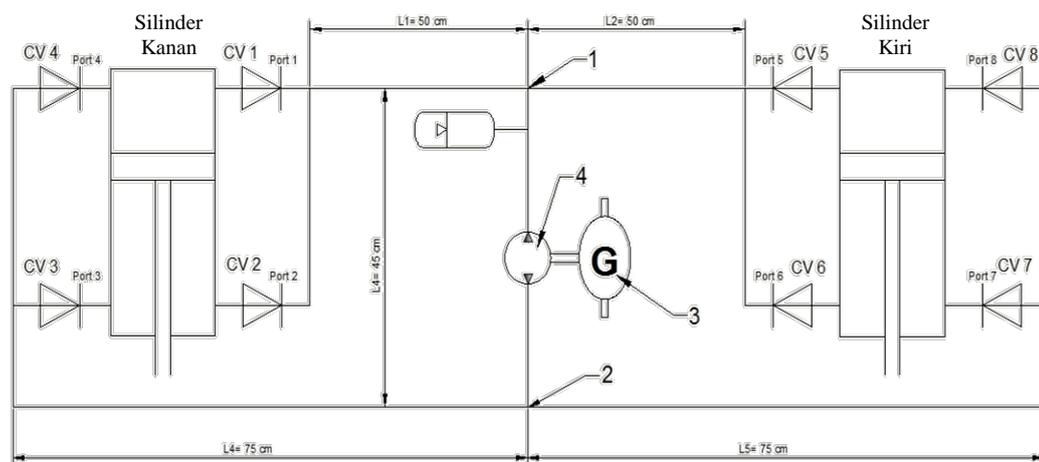
$$\begin{aligned}
F_D &= \Delta P \times A_e \\
F_D &= \frac{\rho}{2} (V_{0e}^2 - V_p^2) \cdot A_e \\
F_D &= \left(\frac{\rho}{2} \left(\frac{A_p}{A_{oe}} V_p \right)^2 - V_p^2 \right) \cdot (A_p - A_{pr}) \\
F_D &= \frac{\rho}{2} (A_p - A_{pr}) V_p^2 \left(\left(\frac{A_p}{A_{oe}} V_p \right)^2 - 1 \right)
\end{aligned}$$

$$F_D = \frac{\rho}{2} (A_p - A_{pr}) \left(\left(\frac{A_p}{A_{oe}} V_p \right)^2 - 1 \right) \dot{x}^2 \quad (4.11)$$

Dimana P adalah tekanan, ρ adalah massa jenis fluida, V_p adalah kecepatan piston (\dot{x}), V_p adalah Kecepatan piston (\dot{x}), V_{0e} adalah kecepatan alir fluida saat ekspansi, V_{0k} adalah kecepatan alir fluida saat kompresi, x adalah besarnya perpindahan piston (m), V_p adalah kecepatan piston (\dot{x}), V_{0e} adalah kecepatan alir fluida saat ekspansi, V_{0k} adalah kecepatan alir fluida saat kompresi, x adalah besarnya perpindahan piston (m), A_{ok} adalah luasan orifice saat kompresi, A_{oe} adalah luasan orifice saat ekspansi, A_p adalah luasan piston, A_{pr} adalah luasan piston rod, F_D adalah gaya redam, dan d_o adalah diameter orifice.

3.5. Pemodelan *Regenerative Shock Absorber* (RSA)

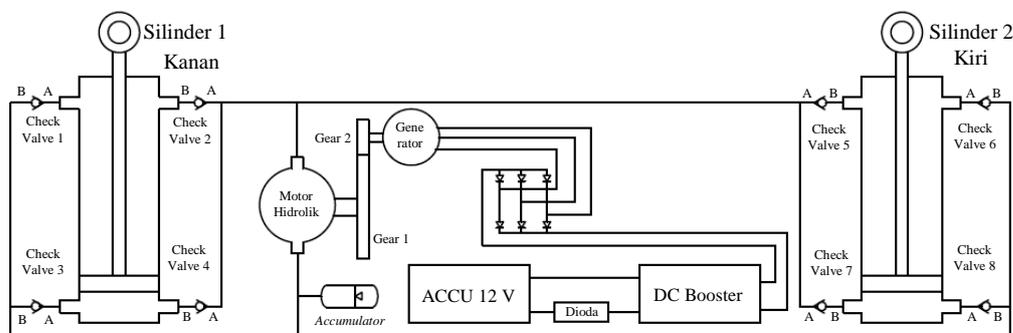
Pemodelan fisik yang digunakan pada perencanaan RSA ini terdapat pada gambar 3.3. Desain HMERSA dalam penelitian ini menggunakan 2 absorber sebagai input dan 1 output untuk memberikan tekanan pada motor hidrolis yang memutar generator untuk menghasilkan energi listrik. 2 absorber ini dihubungkan oleh selang hidrolis dan menghasilkan 1 output untuk memutar motor hidrolis. Pada motor hidrolis terjadi perputaran fluida akibat gerakan naik turun dari absorber yang kemudian memutar motor hidrolis. Motor hidrolis dihubungkan ke generator dengan *spur gear* yang memiliki rasio gear berbeda.



- Keterangan:
- | | |
|------------------|-------------------|
| 1. Sambungan T 1 | 3. Generator |
| 2. Sambungan T 2 | 4. Motor Hidrolis |

Gambar 3.3. Skema HMERSA dual input single output

Untuk menyearahkan putaran motor hidrolis dibutuhkan aliran searah dari absorber dengan menggunakan *check valve* atau katup searah. Fungsinya agar tidak terjadi arus balik pada aliran yang menyebabkan berkurangnya tekanan pada aliran. Untuk mengatasi udara terjebak yang menyebabkan berkurangnya tekanan aliran seperti penelitian sebelumnya, maka digunakan *exhaust air valve* yang berfungsi mengeluarkan udara terjebak pada aliran, serta *diaphragm accumulator* yang berfungsi mengontrol aliran. Untung menghubungkan alat-alat tersebut dalam mekanisme aliran dibutuhkan sambungan T dan L seperti yang ditunjukkan dalam gambar 3.4.



Gambar 3.4. desain HAMERSA

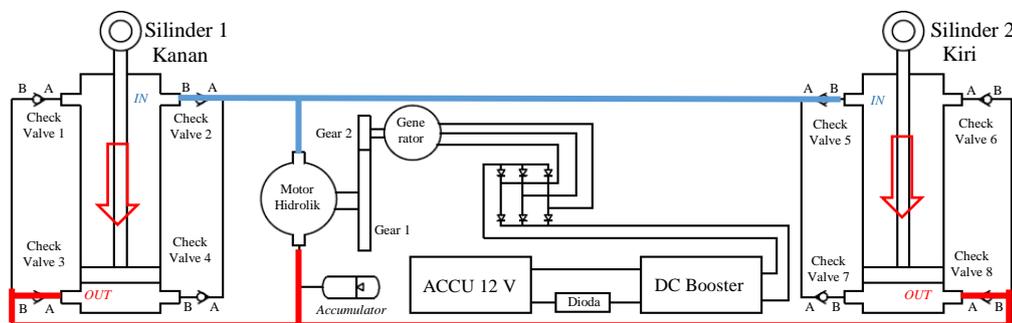
Dasar perencanaan dari redesain HMERSA ini adalah untuk mereduksi *mechanical losses* dan kehilangan tekanan akibat udara terjebak dalam aliran fluida. Sehingga dalam sistem ditambahkan *exhaust air valve* dan *diaphragm accumulator* untuk mereduksi kehilangan tekanan. Untuk mereduksi *mechanical losses* dilakukan tinjauan terhadap kendaraan yang akan diaplikasikan.

Prinsip Kerja

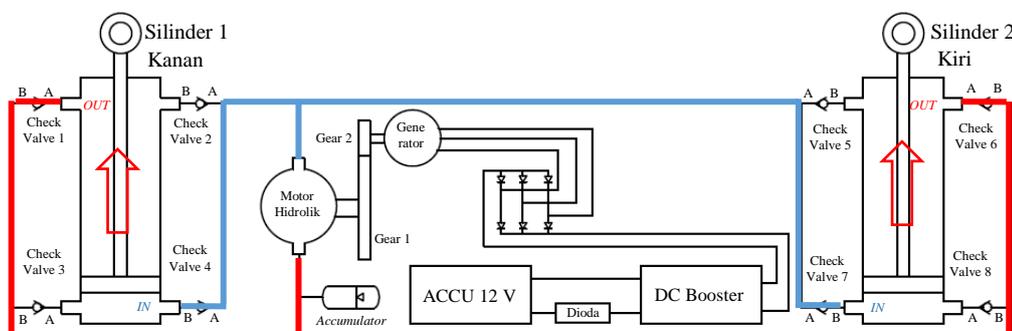
Kondisi piston hidrolis bergerak ke bawah (kompresi), fluida yang terdapat pada silinder nomor 1 keluar menuju *check valves* nomor 2. Pada silinder nomor 2, fluida akan keluar menuju katub searah nomor 8. Fluida hanya bisa melewati katup searah nomor 2 dan 8, pada katup searah nomor 4 dan 6, fluida tertahan (efek penggunaan katup searah). Aliran fluida pada katup searah nomor 2 dan 6 diteruskan ke motor hidrolis. Aliran inilah yang membuat motor hidrolis berputar untuk diteruskan putaranya ke generator melalui spur gear. Generator berputar

dengan kecepatan sudut lebih besar dua setengah kali dari kecepatan sudut motor hidrolik hasil dari perbandingan rasio gear yang digunakan. Aliran yang keluar dari motor hidrolik diteruskan ke katup searah nomor 3 pada silinder hidrolik 1 dan katub searah nomer 5 pada silinder hidrolik 2. Aliran ini terus didorong menuju tabung silinder hidrolik 1 dan silinder hidrolik 2. Berikut ini adalah ilustrasi proses aliran fluida saat piston bergerak ke bawah (kompresi) yang ditunjukkan oleh Gambar 3.5.

Pada saat piston bergerak keatas (ekspansi), fluida yang terdapat pada silinder hidrolik 1 keluar menuju katup searah nomor 1. Pada silinder 2 keluar menuju katub searah nomer 7. Fluida hanya bisa melewati katup searah nomor 1 dan 7, pada katup searah nomor 3 dan nomer 5 fluida tertahan. Aliran fluida pada katup searah nomor 1 dan 7 diteruskan ke motor hidrolik. Setelah melewati motor hidrolik, aliran fluida yang keluar diteruskan katup searah nomor 4 pada silinder hidolik 1 dan katub searah nomor 6 untuk silinder hidrolik 2. Aliran ini terus didorong menuju tabung silinder hidrolik 1 dan silinder hidrolik 2. Berikut pada Gambar 3.6 menunjukkan alur dari pergerakan fluida ketika piston bergerak ke atas.



Gambar 3.5. Ilustrasi Pergerakan Fluida saat Kompresi.



Gambar 3.6. Ilustrasi Pergerakan Fluida saat Ekspansi.

3.6. Pemodelan matematis HMERSA *dual input single output*

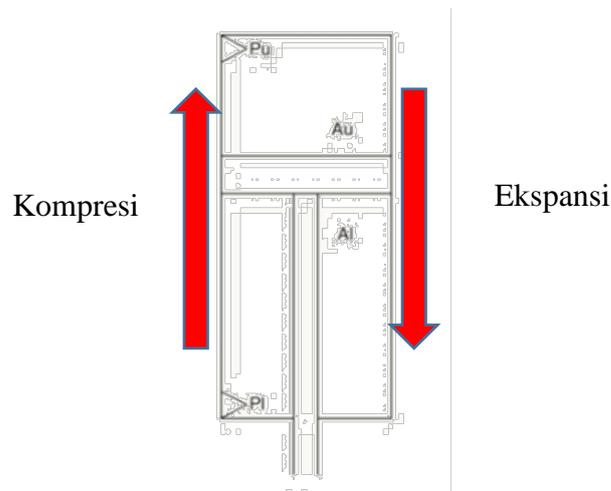
3.6.1. Gaya Redam Pada System Hidrolik HAMERSA

Gaya redam (F_d) yang terjadi pada mekanisme hidrolik HMERSA dual input-single output dipengaruhi oleh perbedaan tekanan pada masing masing luasan permukaan atas dan bawah silinder (gambar 3.7). Pada penelitian ini digunakan dua silinder hidrolik yang identik, sehingga penurunan persamaan gaya redam dalam satuan Newton (N) pada kedua silinder hidrolik sama. Penurunan persamaan gaya redam berdasarkan perbedaan tekanan atas dan bawah silinder hidrolik :

- Saat Kompresi : $Fd_{comp} = P_u \cdot A_u - P_l \cdot A_l$ (4.12)

- Saat Ekspansi : $Fd_{exp} = P_l \cdot A_l - P_u \cdot A_u$ (4.13)

dimana, P_u adalah Tekanan permukaan atas silinder hidrolik (Pa), P_l adalah Tekanan permukaan bawah silinder hidrolik (Pa), A_u adalah Luas permukaan atas silinder (m^2), dan A_l adalah Luas permukaan bawah silinder (m^2).



Gambar 3.7. Mekanisme silinder hidrolik HMERSA

Berdasarkan persamaan energi akibat *head loss*, pada saat kompresi P_l diperoleh dari selisih antara P_u dengan total tekanan pada masing-masing titik akibat headloss sepanjang pipa:

$$p_l = p_u - p_s - p_{cv} - p_{tc} - p_M - p_{td} - p_{hm} \quad (4.14)$$

dimana p_s adalah Tekanan akibat *headloss* pada inlet outlet silinder hidrolik (Pa), p_{cv} adalah Tekanan akibat *headloss* pada *check valve* (Pa), p_{tc} adalah Tekanan akibat *headloss* pada *combining T-Junction* (Pa), p_M adalah Tekanan akibat

headloss pada motor hidrolis dan generator (Pa), p_{td} adalah Tekanan akibat *headloss* pada *dividing T-Junction* (Pa), dan p_{hM} adalah Tekanan akibat *major headloss* pada sistem perpipaan (Pa). Demikian juga pada saat ekspansi, P_u diperoleh dari selisih antara P_l dengan total tekanan pada masing – masing titik akibat head loss sepanjang pipa:

$$p_u = p_l - p_s - p_{cv} - p_{tc} - p_M - p_{td} - p_{hM} \quad (4.15)$$

3.6.1.1. Tekanan pada piston silinder

Pada saat terjadi proses kompresi dan ekspansi di aliran fluida, maka terjadi penekanan pada fluida oleh silinder piston serta piston rod yang masing – masing mempunyai luasan penampang yang berbeda. Tekanan yang timbul dikarenakan perbedaan luas penampang yakni:

1. Pada Silinder hidrolis 1

- Proses Kompresi, $\Delta p_{u1} = \frac{\rho}{2} v_1^2 \left(\left(\frac{A_u}{A_{tube}} \right)^2 - 1 \right)$ (4.16)

- Proses Kompresi, $\Delta p_{l1} = \frac{\rho}{2} v_1^2 \left(\left(\frac{A_u}{A_{tube}} \right)^2 - 1 \right)$ (4.17)

2. Pada Silinder hidrolis 2

- Proses Kompresi, $\Delta p_{u2} = \frac{\rho}{2} v_2^2 \left(\left(\frac{A_u}{A_{tube}} \right)^2 - 1 \right)$ (4.18)

- Proses Kompresi, $\Delta p_{l2} = \frac{\rho}{2} v_2^2 \left(\left(\frac{A_u}{A_{tube}} \right)^2 - 1 \right)$ (4.19)

dimana A_{tube} adalah luas permukaan tube (m^2), ρ adalah mass jenis fluida (kg/m^3), v_1 adalah kecepatan pada silinder 1 (m/s), dan v_2 adalah kecepatan pada silinder 2 (m/s).

3.6.1.2. Tekanan Akibat *Headloss* pada *inlet outlet* Silinder Hidrolis

Pada saat aliran fluida berpindah dari upper section silinder hidrolik menuju ke pipa, terjadi *head losses* akibat adanya perbedaan luasan penampang. Demikian pula saat fluida kembali masuk menuju lower section silinder hidrolik. Penurunan tekanan akibat perbedaan luasan upper dan lower section serta silinder dan pipa adalah:

1. Pada silinder hidrolis 1

$$\Delta p_{s1} = \frac{\rho(C_{in}-C_{out})}{2} v_1^2 \quad (4.20)$$

2. Pada silinder hidrolis 2

$$\Delta p_{s2} = \frac{\rho(C_{in}-C_{out})}{2} v_2^2 \quad (4.21)$$

dimana C_{in} adalah koefisien *losses* pada *enlargement* dan C_{out} adalah koefisien *losses* pada *contraction*.

3.6.1.3. Tekanan akibat *headloss* pada *Check valve*

Saat aliran fluida melewati *check valve* akan terjadi *minor headloss*. Dalam siklus kompresi dan ekspansi, aliran akan melewati dua *check valve*. Perbedaan tekanan akibat *headloss* yang dialami saat melewati *check valve* untuk masing-masing aliran silinder adalah:

1. Pada silinder hidrolis 1

$$\Delta p_{cv1} = \frac{\rho C_d}{2} v_1^2 \quad (4.22)$$

2. Pada silinder hidrolis 2

$$\Delta p_{cv2} = \frac{\rho C_d}{2} v_2^2 \quad (4.23)$$

dimana C_d adalah koefisien *discharge* pada *check valve*.

3.6.1.4. Tekanan akibat *headloss* pada *Combining T-Junction*

Ketika fluida melewati T-Junction akan terjadi *headloss minor*. Dengan mengasumsikan kecepatan fluida pada kedua inlet T-junction sama besar. Besar penurunan tekanan pada T-Junction yang terjadi adalah:

1. Pada silinder hidrolis 1

$$\Delta p_{tc1} = \frac{\rho k_{tc}}{2} v_1^2 \quad (4.24)$$

2. Pada silinder hidrolis 2

$$\Delta p_{tc2} = \frac{\rho k_{tc}}{2} v_2^2 \quad (4.25)$$

dimana k_{tc} adalah koefisien *losses* pada *combinibf T-Junction*.

3.6.1.5. Tekanan Akibat *Headloss* pada Motor Hidrolik dan Generator

Pada sistem HMERSA dual input-single output ini, poros output motor hidrolik terhubung dengan poros generator, dimana momen inersia

motor hidrolis dan generator diabaikan. Dengan mengasumsikan poros kaku, defleksi pada poros dapat diabaikan, hubungan torsi elektrik generator (T_e) dan torsi mekanis motor hidrolis (T_m) adalah:

$$T_e = T_m$$

Substitusi dengan persamaan T_m , sehingga menjadi:

$$T_e = \frac{\Delta p_m q \eta_m}{2\pi} \quad (4.26)$$

Pada rangkaian listrik generator. Arus, tegangan dan torsi elektrik dihasilkan dari:

$$I = \frac{V_e}{R} = \frac{T_e}{K_t} \quad (4.27)$$

$$\text{Sehingga, } T_e = \frac{V_e K_t}{R} \quad (4.28)$$

$$\text{dimana } V_e = K_v \cdot \omega = \frac{K_v \cdot 2\pi \cdot \eta_v A_{tube}}{q} v_3 \quad (4.29)$$

Dengan memasukkan persamaan (4.28) dan (4.29) pada persamaan (4.26), maka diperoleh perbedaan tekanan akibat *headloss* pada motor hidrolis dan generator adalah sebagai berikut:

$$\Delta p_M = \frac{4\pi^2 \cdot K_t \cdot K_v \cdot \eta_v A_{tube}}{q^2 \cdot R \cdot \eta_m} v_3 \quad (4.30)$$

dimana K_v adalah *back emf coefficient*, K_t adalah *torque coefficient*, ω adalah kecepatan motor hidrolis (rad/s), R adalah hambatan eksternal generator (ohm), η_v adalah *efisiensi volumetrik*, η_m adalah *efisiensi mekanis*, v_3 adalah kecepatan aliran pada pipa 3 (m/s), dan q adalah koefisien *displacement* motor hidrolis.

3.6.1.6. Tekanan Akibat *Headloss* pada *Dividing T-Junction*

Ketika fluida melewati T-Junction akan terjadi *headloss* minor. Dengan mengasumsikan kecepatan fluida pada kedua inlet T-junction sama besar. Besar penurunan tekanan pada T-Junction yang terjadi adalah:

1. Pada silinder hidrolis 1

$$\Delta p_{td1} = \frac{\rho K_{td}}{2} v_1^2 \quad (4.31)$$

2. Pada silinder hidrolis 2

$$\Delta p_{td2} = \frac{\rho K_{td}}{2} v_2^2 \quad (4.32)$$

dimana K_{td} adalah koefisien *losses* pada *dividing T-Junction*

3.6.1.7. Tekanan akibat *Major Headloss* pada system perpipaan

1. Pada silinder hidrolis 1

Pada silinder satu, dalam siklus kompresi ataupun ekspansi fluida akan mengalir sepanjang pipa L_2 , L_3 , dan L_5 . Tekanan yang terjadi akibat *headloss major* pada pipa, yakni:

$$\Delta p_{hM1} = \left(\frac{32\gamma(L_2v_1 + L_3v_3 + L_5v_1)}{dt^2} \right) \quad (4.33)$$

dimana γ adalah viskositas dinamis fluida (mm^2/s), L_2 adalah panjang pipa 2 (m), L_3 adalah panjang pipa 3 (m), L_5 adalah panjang pipa 5 (m), dan dt = diameter pipa (m).

2. Pada silinder hidrolis 2

Pada silinder satu, dalam siklus kompresi ataupun ekspansi fluida akan mengalir sepanjang pipa L_1 , L_3 , dan L_4 . Tekanan yang terjadi akibat *headloss major* pada pipa, yakni:

$$\Delta p_{hM2} = \left(\frac{32\gamma(L_1v_2 + L_3v_3 + L_4v_2)}{dt^2} \right) \quad (4.34)$$

dimana L_1 adalah panjang pipa 1 dan L_4 adalah panjang pipa 4.

3.6.1.8. Gaya redam Total

Berdasarkan persamaan (4.14) dan (4.15), hubungan tekanan upper section dan lower section pada silinder hidrolis 1, yakni:

- Pada saat kompresi

$$p_l = p_u - \Delta p_{s1} - \Delta p_{cv1} - \Delta p_{tc1} - \Delta p_M - \Delta p_{td1} - \Delta p_{hM1} \quad (4.35)$$

- Pada saat ekspansi

$$p_u = p_l - \Delta p_{s1} - \Delta p_{cv1} - \Delta p_{tc1} - \Delta p_M - \Delta p_{td1} - \Delta p_{hM1} \quad (4.36)$$

Hubungan upper section dan lower section pada silinder hidrolis 2, yakni:

- Pada saat kompresi

$$p_l = p_u - \Delta p_{s2} - \Delta p_{cv2} - \Delta p_{tc2} - \Delta p_M - \Delta p_{td2} - \Delta p_{hM2} \quad (4.37)$$

- Pada saat ekspansi

$$p_u = p_l - \Delta p_{s2} - \Delta p_{cv2} - \Delta p_{tc2} - \Delta p_M - \Delta p_{td2} - \Delta p_{hM2} \quad (4.38)$$

Dengan menggabungkan persamaan (4.35) dan (4.36) pada persamaan (4.12) dan (4.13), maka diperoleh besar gaya redam pada silinder 1 untuk kasus kompresi dan ekspansi adalah:

- Pada saat kompresi

$$F_D = p_u(A_u - A_l) + (\Delta p_{s1} + \Delta p_{cv1} + \Delta p_{tc1} + \Delta p_M + \Delta p_{td1} + \Delta p_{hM1})A_l \quad (4.39)$$

- Pada saat ekspansi

$$F_D = p_l(A_u - A_l) + (\Delta p_{s1} + \Delta p_{cv1} + \Delta p_{tc1} + \Delta p_M + \Delta p_{td1} + \Delta p_{hM1})A_u \quad (4.40)$$

Dengan menggabungkan persamaan (4.37) dan (4.38) pada persamaan (4.12) dan (4.13), maka diperoleh besar gaya redam pada silinder 2 untuk kasus kompresi dan ekspansi adalah:

- Pada saat kompresi

$$F_D = p_u(A_u - A_l) + (\Delta p_{s2} + \Delta p_{cv2} + \Delta p_{tc2} + \Delta p_M + \Delta p_{td2} + \Delta p_{hM2})A_l \quad (4.39)$$

- Pada saat ekspansi

$$F_D = p_l(A_u - A_l) + (\Delta p_{s2} + \Delta p_{cv2} + \Delta p_{tc2} + \Delta p_M + \Delta p_{td2} + \Delta p_{hM2})A_u \quad (4.40)$$

3.6.2. Daya Bangkit pada Generator

1. Tegangan output generator (V_E)

Kecepatan putaran motor hidrolik dalam satuan rad/s, yakni:

$$\omega = 2 \pi n = \frac{2\pi A_{tube} \eta v}{q} \quad (4.41)$$

Dengan mensubstitusi nilai ω ke persamaan (4.29) diperoleh tengangan output generator dalam satuan volt:

$$V_E = \frac{2\pi k_v A_{tube} \eta v}{q} v_3 \quad (4.42)$$

2. Arus listrik yang dihasilkan (I)

Dengan mensubstitusi nilai V_E pada persamaan (4.27) maka diperoleh besar arus yang dihasilkan dalam satuan ampere, yakni:

$$I = \frac{2\pi k_v A_{tube} \eta v}{qR} v_3 \quad (4.43)$$

3. Daya yang dihasilkan (P)

Daya output generator dinyatakan dengan persamaan:

$$P = V_E \cdot I \quad (4.44)$$

4. Perhitungan efisiensi daya (η) yang dihasilkan

Dari energi getaran yang masuk ke sistem HMERSA tidak seluruhnya terkonversi menjadi energi listrik, sebagian besar energi hilang akibat losses pada aliran fluida. Perhitungan efisiensi daya listrik pada sistem HMERSA dual input-single output adalah:

$$\eta = \frac{P}{P_{mec}} = \frac{P}{(F_{dr} \dot{x}_r + F_{dl} \dot{x}_l)} \quad (4.45)$$

dimana F_{dr} adalah Gaya redam silinder kanan (N) dan F_{dl} adalah Gaya redam silinder kiri (N).

3.7. Rancang Bangun dan Manufaktur HMERSA

Dalam proses pembuatan desain prototype HMERSA dengan 2 input dan 1 output menggunakan software gambar. Pada gambar 3.3 merupakan desain rancangan konstruksi HMERSA yang akan dimanufaktur. Setelah desain konstruksi HAMERSA maka tahapan selanjutnya adalah proses manufaktur. Untuk proses manufaktur dilakukan di bengkel pembuatan silinder hidrolik.

Untuk komponen check valve, selang hidrolik, *air exhaust valve*, *diaphragm accumulator* dan T-junction dibeli di toko peralatan hidrolik. Motor hidrolik, oli dan juga generator telah tersedia di laboratorium. Setelah semua komponen terkumpul baru masuk tahapan proses perakitan yang dilanjutkan pengujian *prototype* HMERSA yang diaplikasikan langsung pada kendaraan roda 4. Untuk jenis kendaraan roda 4 yang akan digunakan adalah pick up yang mempunyai bak terbuka di bagian belakang sehingga memudahkan dalam peletakan perlatan analisisnya.

3.8. Pengujian dan Pengambilan Data

Pada tahap *eksperimen* HMERSA ini, *prototype* HMERSA yang telah di buat lalu dipasang pada kendaraan roda 4 Carry Futura Pick Up (Gambar 3.11).

Tempat penempatan HMERSA dapat dilihat pada gambar 3.12. Setelah itu dilakukan eksperimen pengambilan data langsung untuk menguji *prototype* HMERSA dilakukan dengan variasi kecepatan. Variasi kecepatan yang diujikan yakni 15 km/jam, 20 km/jam dan 25 km/jam. Mobil akan melaju pada kondisi jalan tidak rata untuk mengetahui karakteristik energi bangkitan dan respon percepatan body kendaraan yang dihasilkan.

Karakteristik Energi Bangkitan

Untuk mengetahui nilai energi bangkitan yang dihasilkan oleh HMERSA digunakan Avometer. Fungsi dari avometer adalah untuk mengetahui besarnya tegangan (V) dan nilai dari arus yang dihasilkan (I). Sedangkan untuk mengetahui respon energi bangkitan yang berupa sinyal keluaran listrik voltase digunakan Oscilloscope. Sehingga dengan mengalikan nilai tegangan dan kuat arus, maka diperoleh energi keluaran (P_{out}), sehingga:

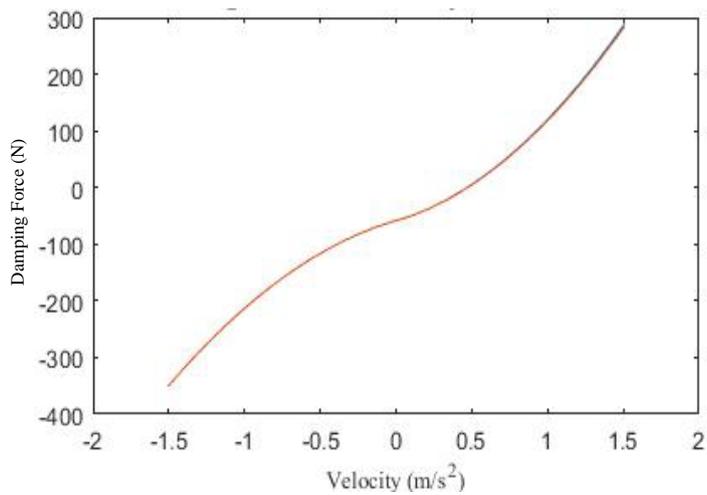
$$P_{out} = V \times I \quad (4.54)$$

Untuk mengetahui karakteristik *regenerative energy* dilakukan dengan cara mengukur perubahan panjang batang *shock absorber* yang terjadi saat melewati bumps dengan variasi kecepatan tertentu. Hal ini dapat dilakukan dengan menempatkan sensor distance meter pada shock absorber dan diukur perubahannya per satuan waktu. Energi input dari perubahan tersebut dapat diketahui dari,

$$P_{in} = \int F_d \cdot d\dot{x} = \int c\dot{x} d\dot{x} = \frac{1}{2} c\dot{x}^2 \quad (4.55)$$

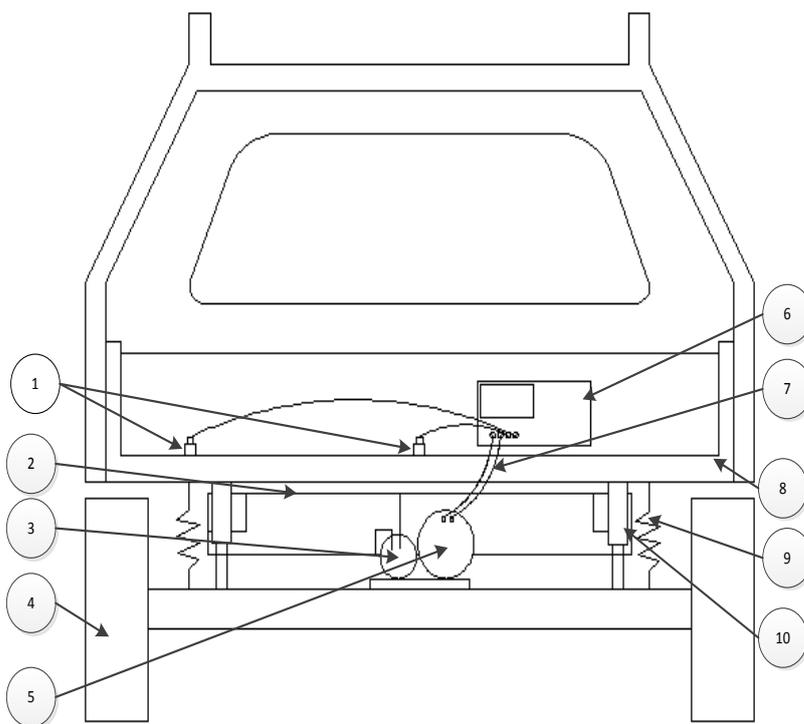
Dimana F_d adalah gaya redam, diperoleh dari grafik eksperimen *conventional shock absorber*, yakni F_d terhadap kecepatan displacement dari absorber per satuan waktu (\dot{x}) (Gambar 3.8), sehingga efisiensi energi bangkitan *shock absorber* (η_{rsa}) menjadi:

$$\eta_{rsa} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4.56)$$



Gambar 3.8. Grafik Simulasi Gaya redam terhadap kecepatan

Penempatan peralatan dalam pengambilan data untuk pengujian HMERSA dapat dilihat pada gambar 3.9. Kendaraan yang dipakai untuk eksperimen terdapat pada gambar 3.10. Sedangkan rencana untuk penempatan HMERSA pada kendaraan dapat dilihat pada gambar 3.11.



Keterangan:

1. *Accelerometer.*
2. *Selang hidrolik absorber.*
3. *Motor hidrolik.*
4. *Roda kendaraan.*
5. *Generator.*
6. *Oscilloscope.*
7. *Kabel Probe Oscilloscope.*
8. *Bak kendaraan.*
9. *Pegas kendaraan.*
10. *Shock Absorber.*

Gambar 3.9. Skema pengujian HMERSA



Gambar 3.10. Kendaraan Pick up



Gambar 3.11. Rencana penempatan HMERSA

3.9. Analisa

Dari keseluruhan tahapan dan proses pengujian eksperimen dan simulasi maka didapatkan hasil yang kemudian dianalisa. Hasil analisa tersebut akan dievaluasi lalu dibandingkan dengan data penelitian sebelumnya, untuk mengetahui kemajuan dari penelitian yang telah dilakukan. Hasil evaluasi tersebut akan merujuk pada kesimpulan dari penelitian yang akan dituliskan pada laporan buku tesis.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Penentuan parameter desain *Hydro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber (HMERSA)*

Dalam penelitian ini, kami menggunakan dua *shock absorber* yang mempunyai dimensi sama. Pada proses penentuan dimensi tersebut, kami sesuaikan perencananya dengan kebutuhan generator yang ada di laboratorium untuk menghasilkan energi. Adapun parameter yang sudah kami tentukan yakni:

- Daya motor (P_{mh}) : 100 watt
- *Shaft speed motor* (η_{mh}) : 450 rpm
- Percepatan Gravitasi (g) : $9,81 \text{ m/s}^2$
- Panjang Pipa (L) : 1,6 m
- Diameter pipa (D_2) : $3/8 \text{ in} = 0,009525 \text{ m}$
- Massa jenis fluida (ρ) : 860 kg/m^3
- Viskositas fluida (ν) : $0,0000089 \text{ m}^2/\text{s}$
- Geometric displacement (d) : $0,0000082 \text{ m}^3/\text{rev}$
- Amplitudo (x) : 0,02 m
- Frekuensi (f) : 1,7 Hz
- Waktu $1/2$ Gelombang (t) : 0,294 s

Untuk mengetahui Torsi motor hidrolis (T_{mh}) yang diperlukan, maka dilakukan perhitungan:

$$\eta_{mh} = 450 \text{ rpm} = 7,5 \text{ rad/s} \text{ dan } P_{mh} = 100 \text{ watt} = 100 \text{ Nm/s}$$

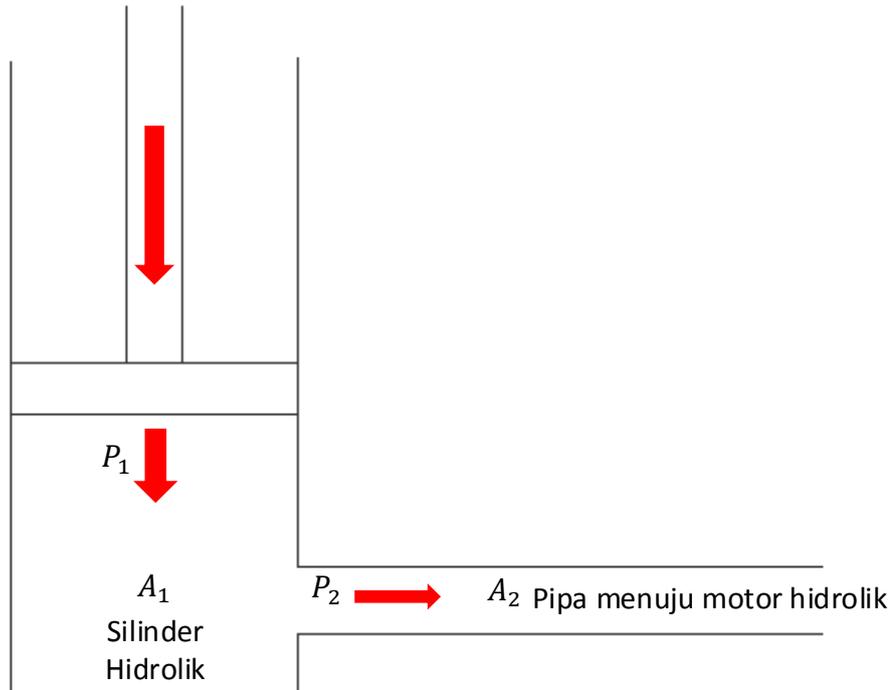
$$\text{maka, } T_{mh} = P_{mh}/\eta_{mh} = 100 \text{ Nm/s}/7,5 \text{ rad/s} = 13,33 \text{ Nm}$$

perbedaan tekanan aliran fluida pada HMERSA akibat perbedaan luas penampang digambarkan pada gambar 4.1. Fluida diasumsikan *incompressible fluid*. Maka debit aliran pada silinder hidrolis sama dengan debit aliran pipa yang menuju motor hidrolis. Sehingga untuk menentukan tekanan pada titik 2:

$$T_{mh} = P_2 \cdot d/2\pi$$

$$T_{mh} \cdot 2\pi = P_2 \cdot d; \text{ sehingga } P_2 = T_{mh} \cdot 2\pi/d$$

$$P_2 = \frac{13,33 \text{ Nm} \cdot 2\pi}{0,0000082 \text{ m}^3/\text{rev}} = 10216561,48 \text{ N/m}^2$$



Gambar 4.1. Aliran fluida pada HMERSA

Untuk menentukan debit aliran, maka:

$$\eta_{mh} = Q/d ; \text{ sehingga } Q = \eta_{mh} \cdot d = 450 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times 0,0000082 \frac{\text{m}^3}{\text{rev}}$$

$$\text{maka } Q = 3,69 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

Untuk menentukan kecepatan pada penampang 1, maka:

$$v_1 = X/t = 0,02 \text{ m} / 0,294 \text{ s} = 0,068 \text{ m/s}$$

Untuk menentukan luas penampang silinder hidrolik (A_1), maka:

$$Q = v_1 \cdot A_1 ; \text{ sehingga } A_1 = Q/v_1 = 3,69 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min}} / 0,068 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$A_1 = 9,044 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

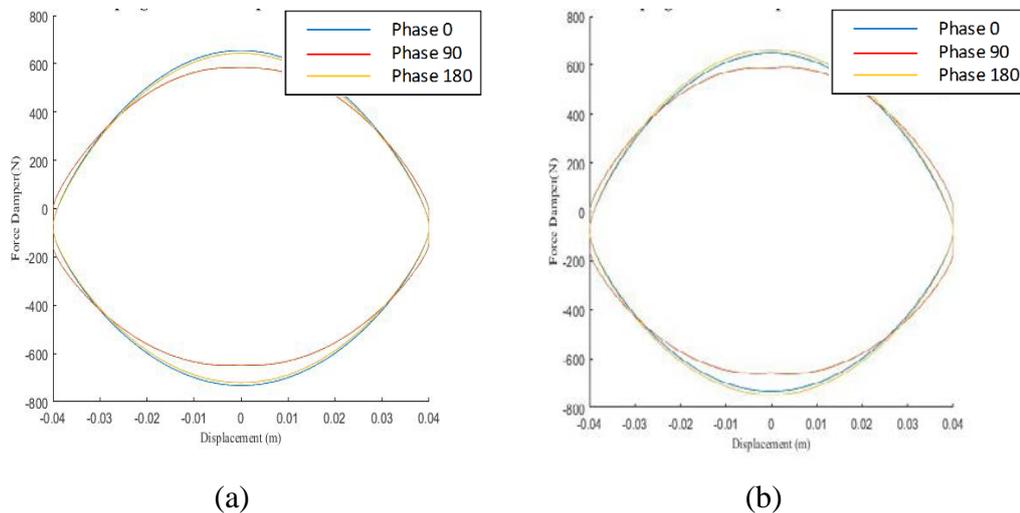
Untuk menentukan diameter silinder hidrolik (D_1), maka:

$$A_1 = \frac{\pi}{4} D_1^2 ; \text{ sehingga } D_1 = \sqrt{\frac{A_1}{\pi/4}} = 0,03392 \text{ m} = 33,92 \text{ mm}$$

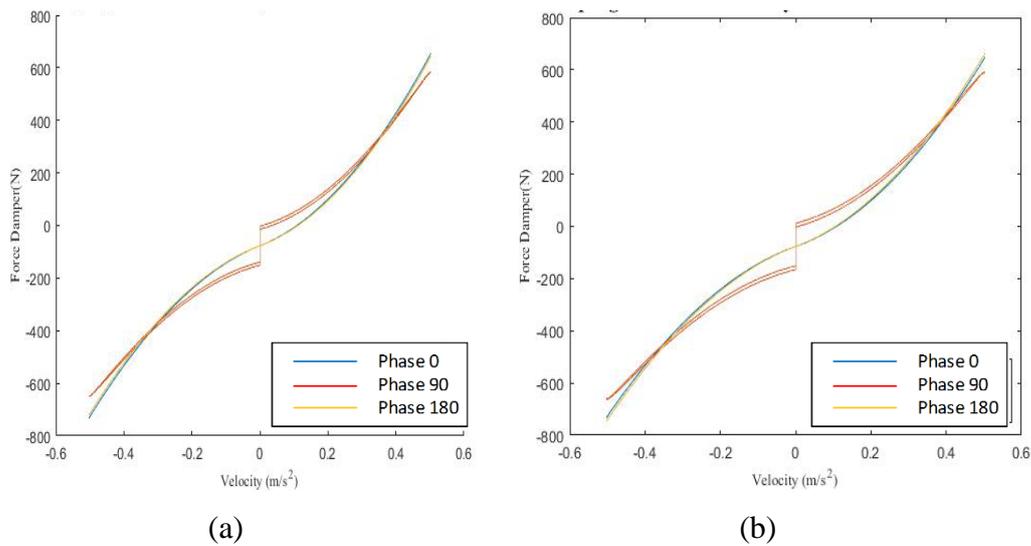
Sehingga ukuran diameter silinder hidrolik yang digunakan pada penelitian ini yakni 33,92 mm.

4.2. Simulasi respon dinamis Hydro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber (HMERSA) variasi beda fase

Setelah mendapatkan parameter yang digunakan dalam perancangan sistem HMERSA, kemudian dilakukan simulasi respon dinamis. Hal ini diperlukan untuk melihat seberapa besar energi regeneratif yang dihasilkan dalam perancangan sistem HMERSA. Simulasi yang dilakukan yakni untuk mengetahui respon gaya redam terhadap pengaruh beda fase dari input sinusoidal HMERSA. Pilihan beda fase yang diberikan yakni 0° , 90° dan 180° . Pada fase 0° kondisi pada kedua roda mobil terkena bumps sehingga hanya mengalami gaya translasi. Pada fase 90° terjadi kondisi salah satu ban mobil terkena bumps sedangkan satunya berada pada jalan rata. Pada kondisi ini, mobil mengalami gaya tranlasi dan rotasi. Sedangkan pada fase 180° , terjadi kondisi salah satu ban mobil terkena bumps sedangkan satunya terkena lubang. Pada kondisi ini, mobil mengalami gaya full rotasi. Dengan variasi ini nantinya akan dianalisa gaya redam dan energi bangkitan sistem HMERSA. Dalam simulasi ini diberikan input sinusoidal dengan amplitudo 4 cm dan frekuensi eksitasi sebesar 2 Hz. Hasil respon gaya redam dan energi bangkitan sistem HMERSA dapat dilihat pada gambar 4.2, 4.3 dan 4.4.



Gambar 4.2. Respon gaya redam suspensi kiri (a) dan kanan (b) terhadap *displacement*



Gambar 4.3. Respon gaya redam suspensi kiri (a) dan kanan (b) terhadap *velocity*

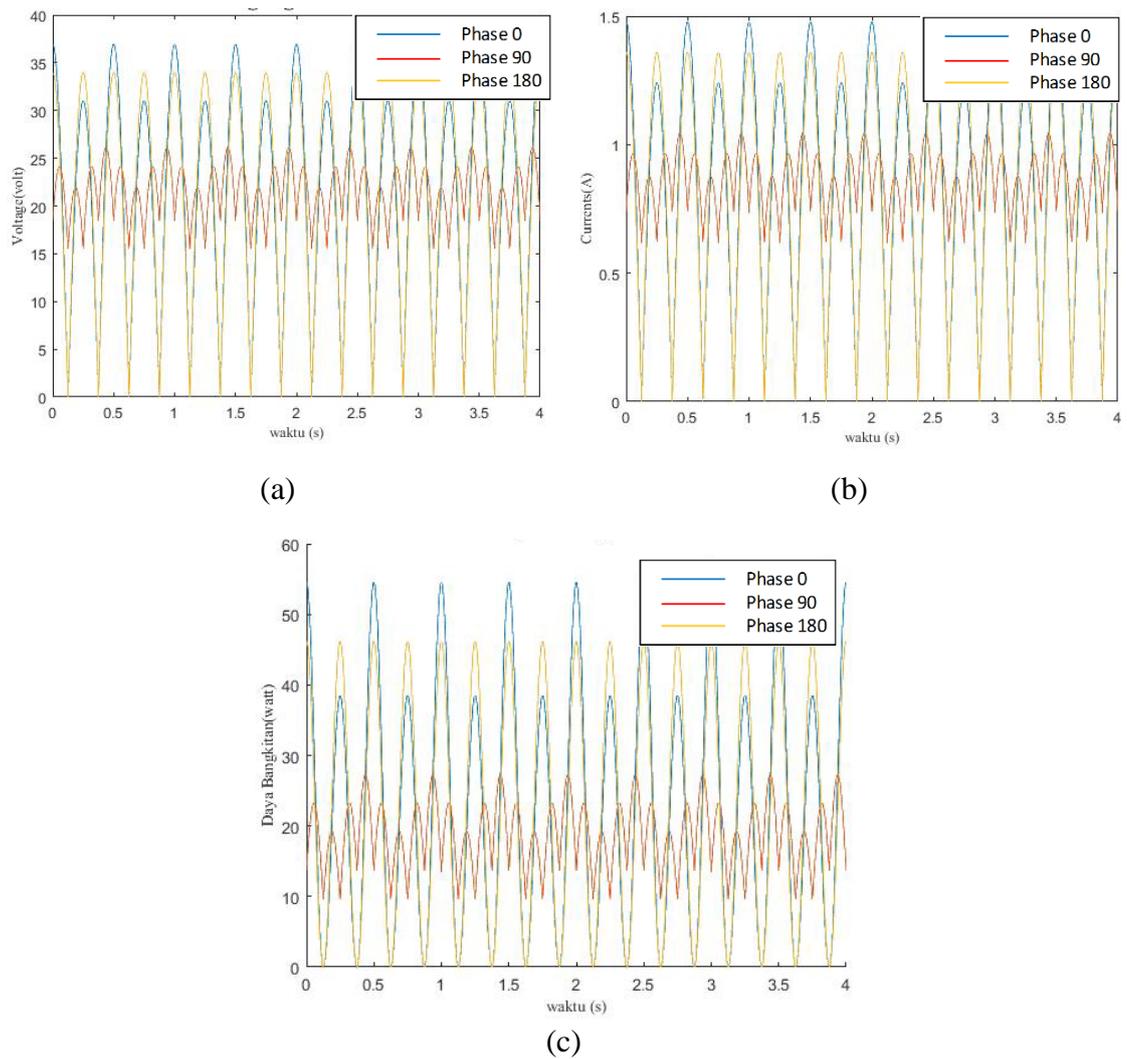
Tabel 4.1. Nilai gaya redam pada fase yang berbeda

	Beda Fase 0	Beda Fase 90	Beda Fase 180
Gaya redam kiri (Fdl)	451,34 N	422,62 N	443,06 N
Gaya redam Kanan (Fdr)	449,27 N	434,99 N	459,23 N

Pada tabel 4.1. ditampilkan nilai *root mean square* (rms) total pada masing-masing suspensi dengan variasi beda fase. Pada gambar respon gaya redam dapat dilihat, bahwa besar gaya redam pada proses ekspansi dan kompresi berbeda, serta hubungan gaya redam dan kecepatan tidak linear. Karakteristik gaya redam pada fase 90° sedikit berbeda dengan fase yang lain. Hal ini disebabkan saat silinder 1 mencapai kecepatan maksimum, silinder 2 masih berada pada kecepatan nol, demikian pula sebaliknya. Sehingga gaya redam akan terus menerus dihasilkan oleh tiap silinder walaupun kecepatan gerak salahsatunya bernilai nol.

Nilai gaya redam paling besar saat kompresi didapatkan pada beda fase 0°. Nilai gaya redam saat ekspansi didapatkan saat beda fase 180°. Nilai gaya redam saat beda fase 90° terlihat relatif lebih kecil daripada fase yang lain.

Untuk respon tegangan, arus dan daya bangkitan yang dihasilkan HMERSA pada masing-masing fase dapat dilihat pada gambar 4.4. Untuk nilai rms total tegangan, arus, dan daya bangkitan masing-masing fase dapat dilihat pada tabel 4.2.



Gambar 4.4. Grafik respon tegangan (a), arus (b), dan daya (c) yang dihasilkan Tabel 4.2. Nilai rms tegangan, arus, dan daya bangkitan

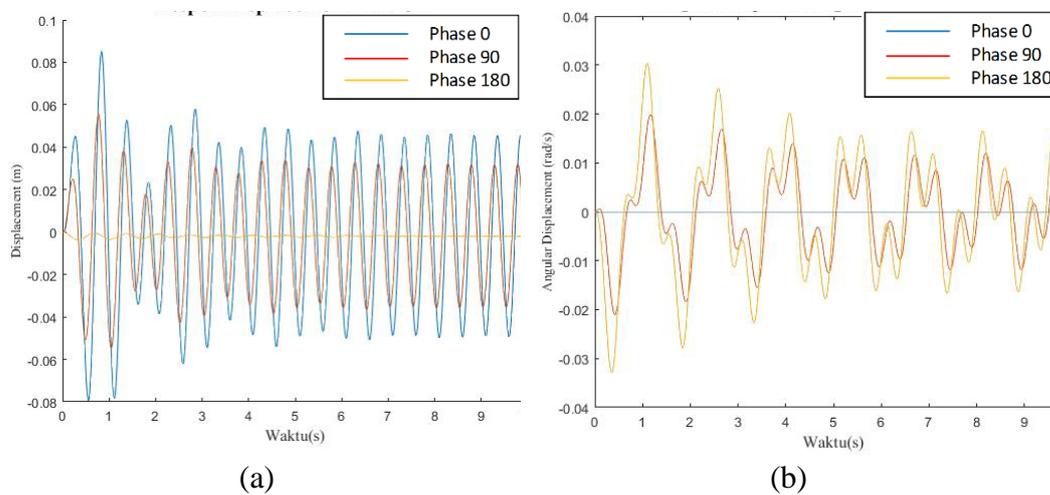
Beda Fase	Tegangan	Arus	Daya
0°	24,124 volt	0,965 A	28,97 watt
90°	21,74 volt	0,869 A	19,42 watt
180°	24,03 volt	0,961 A	24,12 watt

Dari tabel 5.2 dapat dapat diamati bahwa nilai tegangan, arus dan daya terbesar terjadi saat beda fase 0°. Pada beda fase 90° nilai tegangan, arus dan daya

relatif lebih rendah dirodadingkan yang lain. Sedangkan hasil grafik respon yang lebih kontinyu dan stabil, terlihat pada beda fase 180°.

4.3. Simulasi respon dinamis *Half-Car* bagian belakang *Hydro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber (HMERSA)* variasi beda fase

Simulasi ini dilakukan pada *half-car* bagian belakang yang sudah terpasang HMERSA. Dalam simulasi ini diberikan input sinusoidal dengan amplitudo 4 cm dan frekuensi eksitasi sebesar 2 Hz. Gambar 4.5 merupakan grafik respon *displacement* dan *angular displacement* pada *half-car* bagian belakang.

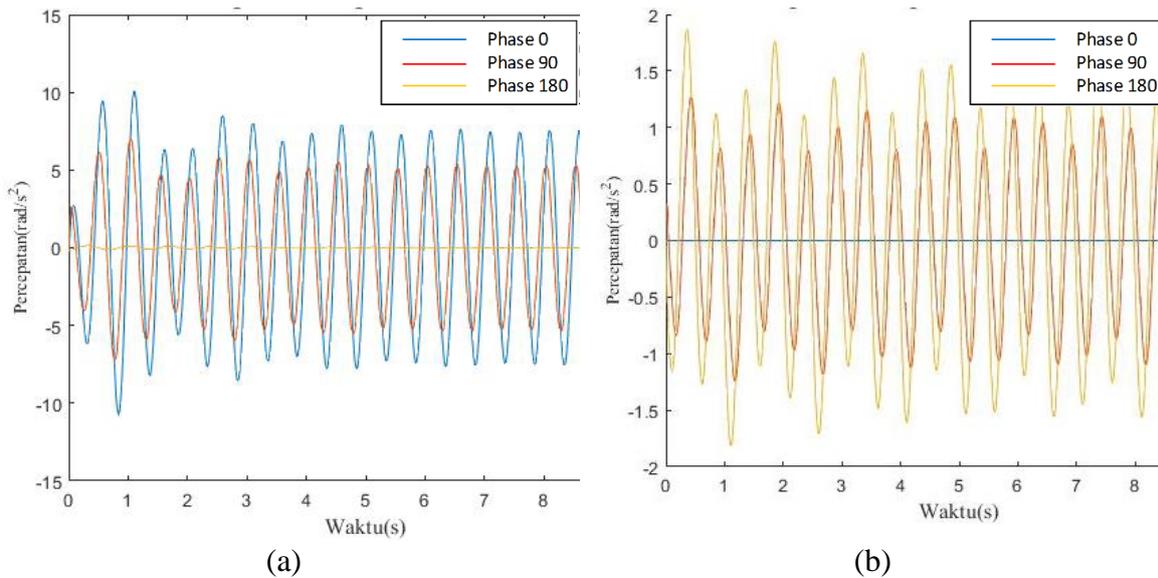


Gambar 4.5. Grafik respon *displacement* (a) dan *angular displacement* (b) terhadap waktu pada *half-car* bagian belakang.

Pada gambar 4.5 terdapat tiga variasi. Pada variasi pertama 0° diberikan eksitasi permukaan jalan yang sama pada kiri dan kanan roda kendaraan. Pada bagian kedua diberikan beda fase 90° antara roda kiri dan kanan kendaraan, sedangkan variasi ke tiga dengan beda fase 180°.

Nilai *displacement* dan *angular displacement* yang paling besar yakni pada beda fase 0°, kemudian beda fase 90° dan 180°. Pada saat beda fase 0° tidak terdapat gerak *rolling*, hal ini terjadi karena eksitasi antara roda kiri dan kanan kendaraan sama besarnya, sehingga tidak terjadi momen *rolling*. Pada saat beda phase 180° tidak terdapat *displacement* pada arah vertikal, hal ini disebabkan pusat massa body kendaraan tidak bergerak terhadap sumbu vertikal serta hanya bergerak rotasi (*rolling*).

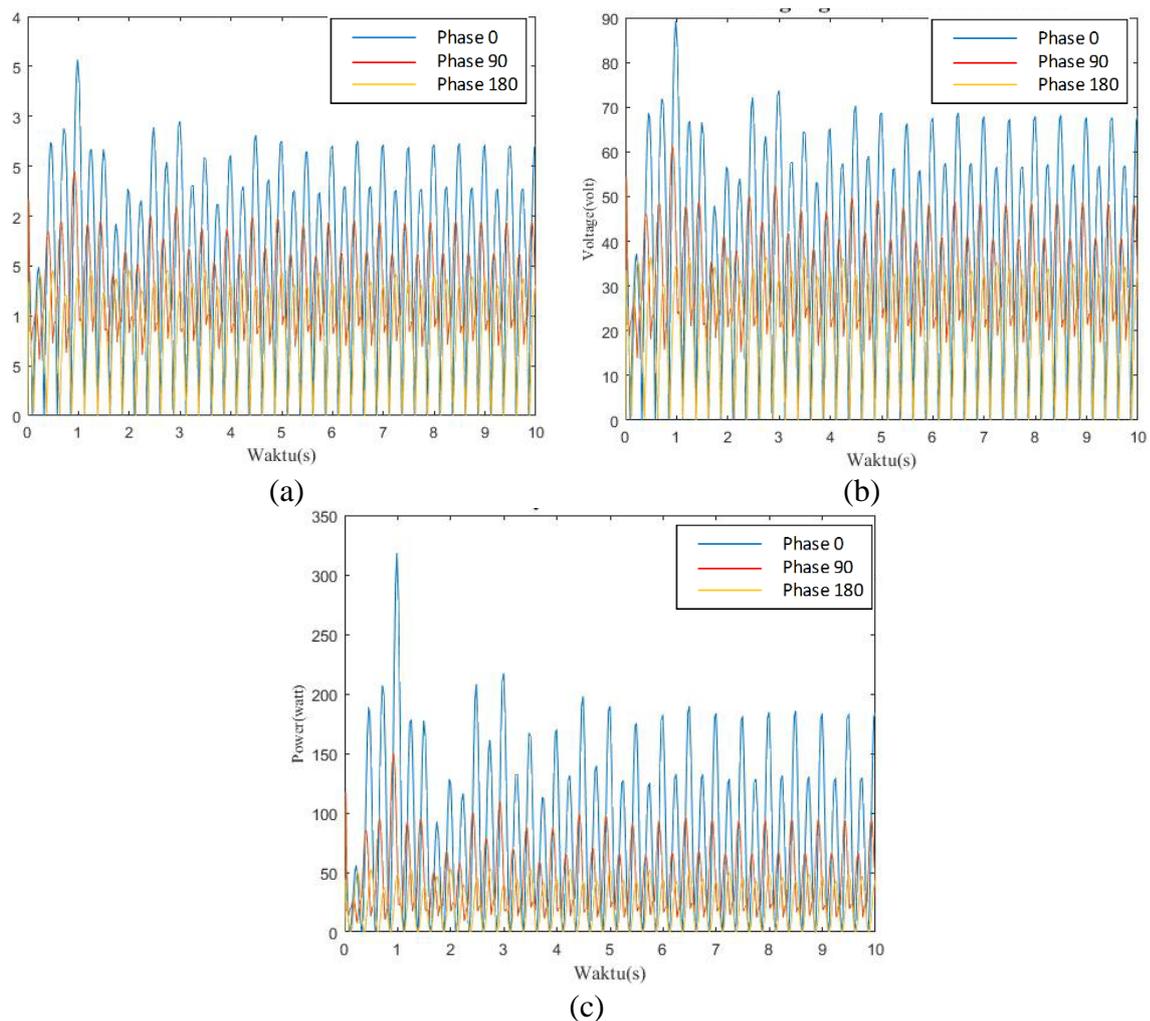
Pada gambar 4.6. merupakan grafik respon percepatan dan percepatan sudut pada *half-car* bagian belakang. Terdapat tiga variasi dalam simulasi tersebut. Pada variasi pertama 0° diberikan eksitasi permukaan jalan yang sama pada kiri dan kanan roda kendaraan. Pada bagian kedua diberikan beda fase 90° antara roda kiri dan kanan kendaraan, sedangkan variasi ke tiga dengan beda fase 180° .



Gambar 4.6. Respon percepatan (a) dan percepatan sudut (b) terhadap waktu.

Nilai respon percepatan dan percepatan sudut yang paling besar yakni pada beda fase 0° , kemudian beda fase 90° dan 180° . Pada saat beda fase 0° tidak terdapat gerak *rolling*, hal ini terjadi karena eksitasi antara roda kiri dan kanan kendaraan sama besarnya, sehingga tidak terjadi momen rolling. Pada saat beda phase 180° tidak terdapat *displacement* pada arah vertikal, hal ini disebabkan pusat massa body kendaraan tidak bergerak terhadap sumbu vertikal serta hanya bergerak rotasi (*rolling*).

Pada gambar 4.7. merupakan grafik respon tegangan, arus dan daya HMERSA pada *half-car*. Terdapat tiga variasi dalam simulasi tersebut. Pada variasi pertama 0° diberikan eksitasi permukaan jalan yang sama pada kiri dan kanan roda kendaraan. Pada bagian kedua diberikan beda fase 90° antara roda kiri dan kanan kendaraan, sedangkan variasi ke tiga dengan beda fase 180° .



Gambar 4.7. Grafik respon arus (a), tegangan (b) dan daya (c) yang dihasilkan.

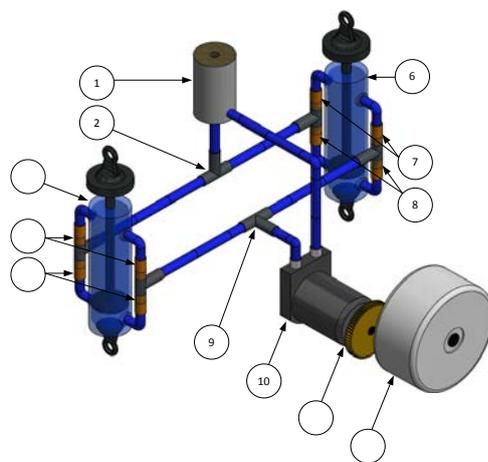
Nilai rms arus listrik, tegangan dan daya bangkitan ditampilkan pada tabel 4.3. Dari tabel tersebut terlihat bahwa nilai arus listrik, tegangan dan daya listrik paling besar terdapat pada beda fase 0° kemudian diikuti beda fase 90° dan 180° . Hal ini terjadi karena pada beda fase 0° , motor hidrolik memperoleh tekanan fluida dari kedua silinder. Hal ini disebabkan roda bagian kiri dan kanan mendapatkan eksitasi secara bersamaan. Motor hidrolik yang mendapat tekanan tersebut memutar generator lebih cepat dirodadingkan beda fase 90° dan 180° .

Tabel 4.3. Nilai rms tegangan, arus, dan daya bangkitan *half-car*

Beda Fase	Arus	Tegangan	Daya
0°	1,62 A	40,63 volt	91,94 watt
90°	1,29 A	32,45 volt	50,12 watt
180°	0,85 A	21,39 volt	24,93 watt

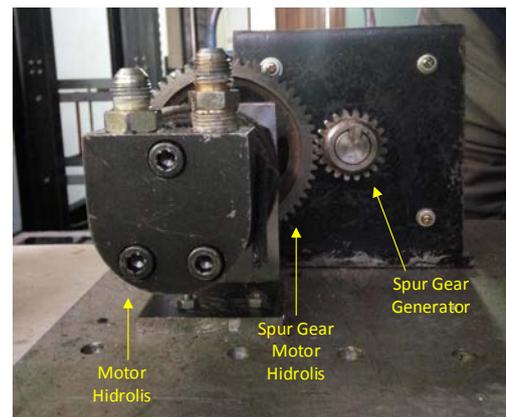
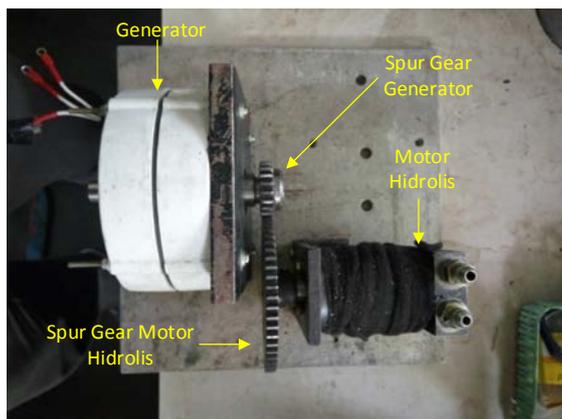
4.4. Manufaktur Komponen dan *Assembling Hydro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber (HMERSA)*

Pada tahapan ini dilakukan manufaktur komponen berdasarkan konsep desain dan permodelan yang sudah dilakukan. Konsep desain yang digunakan seperti terlihat pada gambar 4.8. Parameter yang digunakan dalam proses manufaktur mengikuti hal tersebut. Beberapa komponen sudah ada di laboratorium manufaktur. Komponen yang tidak dibuat ulang seperti terlihat pada gambar 4.9.



1. Tangki reservoir.
2. Sambungan T input fluida, dari reservoir ke silinder.
3. Silinder hidrolis kiri.
4. Check valve ekspansi kiri.
5. Check valve kompresi kiri.
6. Silinder hidrolis kanan.
7. Check valve ekspansi kanan.
8. Check valve kompresi kanan.
9. Sambungan T input fluida, dari silinder ke motor hidrolis.
10. Motor hidrolis.
11. Spur gear.
12. Generator.

Gambar 4.8. Desain HMERSA



Gambar 4.9. Komponen yang sudah ada laboratorium *vibrasi*.

Selanjutnya dibuat komponen pendukung dalam sistem HMERSA. Komponen yang dibuat berupa *T-Junction* untuk *check-valve* dan selang $\frac{1}{4}$ inci untuk saluran fluida dari silinder absorber menuju motor hidrolis. Dalam proses

assembling dan implementasi terdapat beberapa kendala yang mengharuskan merubah part yang sudah dibuat di awal. Part yang sudah dibuat dalam penelitian ini seperti terdapat pada gambar 4.10.



(a)

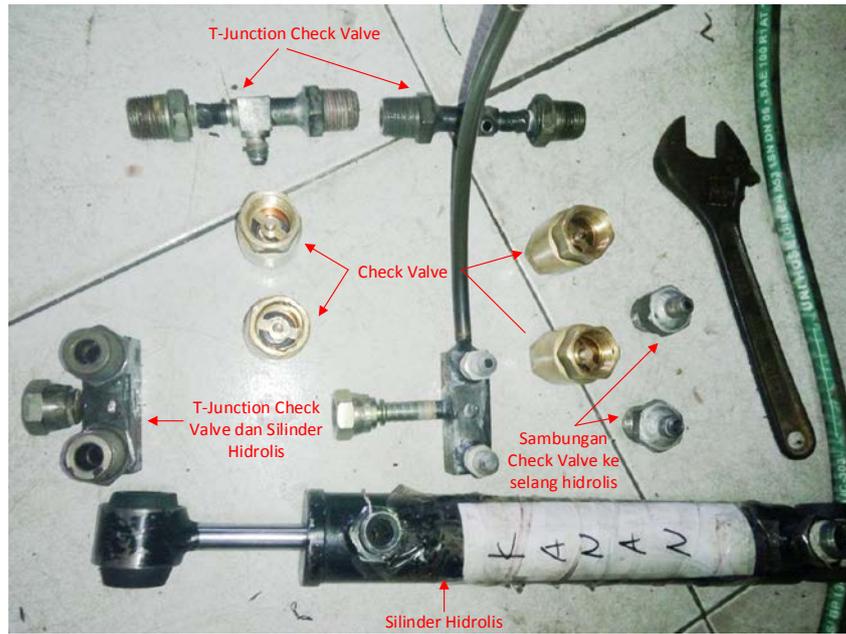


(b)

Gambar 4.10. (a) *T-Junction* untuk silinder hidrolis ke *check-valve* dan (b) *T-Junction* antar *check valve* ke selang hidrolis

Ada beberapa kali penyesuaian dalam pembuatan *T-Junction*. Hal ini dilakukan karena check valve yang digunakan menyesuaikan yang ada di pasaran. Dalam perencanaan seharusnya kami menggunakan *check valve* dengan ukuran $\frac{1}{4}$ inchi, tapi kami kesulitan mendapatkan ukuran tersebut. Hal yang kami lakukan yakni menggunakan *check valve* dengan tekanan minimum dan ukuran terkecil yang ada dipasaran. *Check valve* yang kami pilih yakni *check valve* untuk air dengan ukuran terkecil yakni $\frac{1}{2}$ inchi. *T-Junction* kami *custom* agar bisa langsung menyesuaikan ukuran check valve dan selang hidrolis yang kami gunakan. Hal tersebut kami lakukan untuk meminimalisir panjang aliran yang terjadi dan tempat yang tersedia di bawah mobil pada saat implementasi. Gambar bagian-bagian komponen saat implementasi HMERSA seperti terlihat pada gambar 4.11.

Selain *T-Junction*, kami juga membuat *reservoir tank* yang ukurannya disesuaikan dengan kebutuhan fluida silinder hidrolis. Hal ini dilakukan supaya *supply fluida* untuk silinder hidrolis tetap terjaga sehingga meminimalisir udara terjebak. *Reservoir tank* yang kami buat seperti terlihat pada gambar 4.12.



Gambar 4.11. Komponen yang digunakan dalam implementasi HMERSA.



Gambar 4.12. Reservoir tank yang digunakan dalam implementasi HMERSA.

4.5. Implementasi *Hydro Magneto Electric Hydro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber* (HMERSA) pada kendaraan angkutan barang

Implementasi pada kendaraan angkut ini dilakukan untuk mengetahui *energy regenerative* yang dihasilkan HMERSA pada profil jalan yang dilewatinya. Kendaraan yang dipilih adalah mobil angkut bak terbuka. Hal ini dipilih berdasarkan kemudahan akses dalam pemasangan dan pengambilan data HMERSA. Pada gambar 4.13 diperlihatkan posisi HMERSA yang telah dipasang pada kendaraan angkut bak terbuka. Pada gambar 4.14 diperlihatkan posisi pemasangan HMERSA pada sebelah kanan dan kiri kendaraan tersebut.



Gambar 4.13 Posisi HMERSA pada kendaraan angkutan barang.



(a)



(b)

Gambar 4.14 Penempatan HMERSA pada kendaraan angkutan barang sisi kanan (a) dan kiri (b).

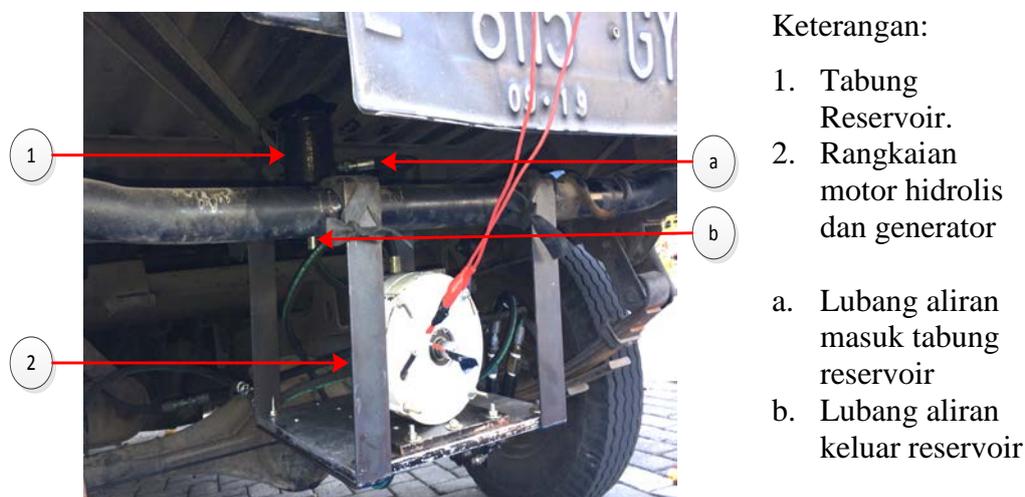
Pada gambar 4.13 dan 4.14 dapat kita lihat bahwa implementasi HMERSA pada kendaraan angkutan barang tidak merubah konstruksi chasis kendaraan. HMERSA dapat langsung dipasang pada kendaraan untuk menggantikan *shock absorber conventional*. Posisi HMERSA sebelah kanan dan kiri tidaklah sama. Posisi HMERSA sebelah kanan menjorok ke depan akan tetapi posisi HMERSA sebelah kiri menjorok kebelakang.

Pada gambar 4.13 dan 4.14 dapat dilihat juga bahwa rangkaian selang tidak mengganggu kinerja komponen asli kendaraan yang berada dibawah chasis. Rangkaian selang dari HMERSA ke motor hidrolis dapat langsung terhubung tanpa berbelit-belit mengikuti konstruksi bagian bawah kendaraan angkut. Posisi HMERSA yang tidak sama menyebabkan selang bagian kanan lebih panjang dari selang bagian kiri. Sambungan T selang hidrolis tetap ditempatkan ditengah(dibelakang rangkaian motor hidrolis dan generator) untuk memudahkan implementasinya.

Pada gambar 4.14 dapat dilihat bahwa check valve langsung terhubung dengan komponen HMERSA. Check valve aliran masuk HMERSA dan aliran keluar HMERSA dihubungkan ke HMERSA dengan menggunakan T-junction. Hal ini dilakukan untuk meminimalisir panjang rangkaian hidrolis yang menghubungkan HMERSA dengan sistem checkvalve. Check valve digunakan untuk membuat aliran dalam rangkaian hidrolis menjadi searah, sehingga motor hidrolis yang terhubung dengan generator berputar searah.

Pada gambar 4.15 diperlihatkan posisi penempatan tabung *reservoir* diatas rangkaian motor hidrolis dan generator. Tabung reservoir ditempatkan pada bagian *supporting* bak kendaraan. Hal ini dilakukan agar oli hidrolis dapat mengalir dengan baik ke HMERSA memanfaatkan gaya gravitasi dan daya hisap vakum pada saat HMERSA ekspansi. Pada gambar 4.15 diperlihatkan dua Lubang pada reservoir, yakni Lubang masuk dari check valve aliran keluar HMERSA dan Lubang keluar menuju check valve aliran masuk HMERSA. Posisi Lubangnya, untuk Lubang masuk aliran fluida ditempatkan sedikit diatas Lubang keluar aliran fluida pada reservoir. Untuk isian oli minimal sekitar 1,5 cm diatas Lubang masuk fluida dari HMERSA, hal ini dilakukan untuk meminimalisir jeda waktu masuk dan

keluar oli fluida pada reservoir. Dengan meminimalisir jeda waktu tersebut, maka kemungkinan udara tersebut pada sistem aliran fluida dapat diminimalisir.



Gambar 4.15 Posisi tabung *reservoir* pada implementasi HMERSA.

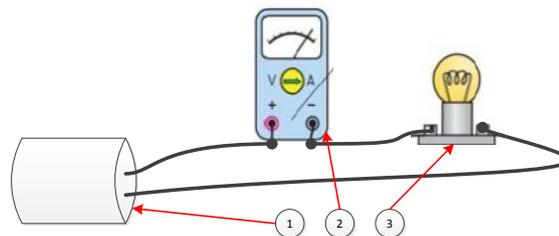
Penempatan motor hidrolis dan generator ke *chasis* kendaraan dengan menggunakan rangka besi plat strip yang dikaitkan ke batang tengah *chasis*. Hal ini dilakukan untuk mempermudah dalam pengaplikasiannya, sehingga dapat mempersingkat waktu dalam proses pembongkaran dan pemasangan. Selain itu pemilihan plat ini karena rangka besi ini sanggup menahan berat rangkaian motor hidrolis dan generator, sehingga rangkaian tersebut tetap pada posisinya saat kendaraan berjalan melewati profil jalan yang berbeda-beda.

4.6. Pengambilan Data dan Pengujian HMERSA

Pengambilan data dan pengujian HMERSA menggunakan beberapa alat ukur penunjang. Alat ukur tersebut yakni *oscilloscope* dan *multimeter digital*. Pengambilan data dilakukan pada kondisi HMERSA yang hanya ditekan dengan tangan manusia dan pengambilan data pada *bumps* jalan. Pengukuran respon percepatan kendaraan digunakan *accelerometer* yang terhubung dengan *oscilloscope* untuk recording data yang dihasilkan. Sebelum ke *oscilloscope*, *accelerometer* dihubungkan ke *amplifier* untuk menaikkan respon tegangannya

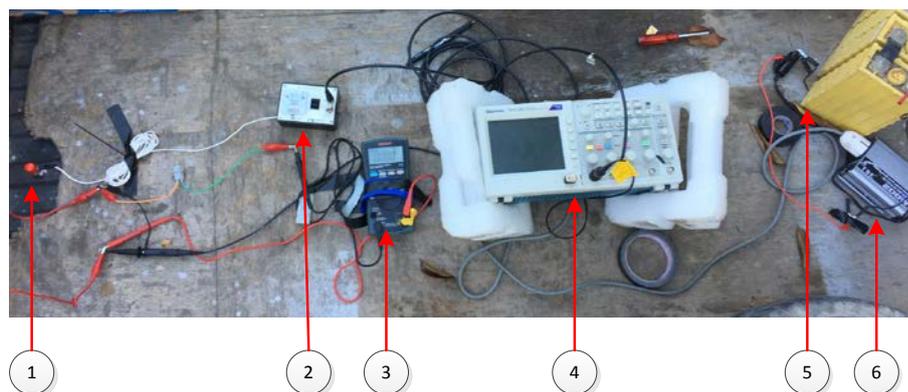
sehingga dapat dibaca oleh oscilloscope. Accelerometer ditempatkan pada belakang bak bagian tengah.

Untuk pengukuran kuat arus digunakan beroda lampu dengan spesifikasi 12 volt dan daya 5 watt AC. Cara pengukuran skema arus listrik ditunjukkan pada gambar 4.15. Skema ini yang kemudian dipakai agar besar arus listrik dapat diukur oleh mutimeter. Pada gambar 4.16 ditunjukkan skema rangkaian elektronik pada pengujian HMERSA.



Keterangan gambar: (1) Generator, (2) Multimeter, dan (3) Lampu 12 volt 5 watt.
Gambar 4.16. Skema pengukuran kuat arus listrik.

Tegangan yang dihasilkan oleh generator merupakan tegangan AC yang direcord pada oscilloscope, sedangkan record pengukuran kuat arus digunakan *camera video recorder* untuk mengetahui hasil pengukuran data puncak yang tertera pada layar digital multimeter pada setting pengukuran kuat arus AC. Tampilan rangkaian elektronik pengambilan data terdapat pada gambar 4.17.



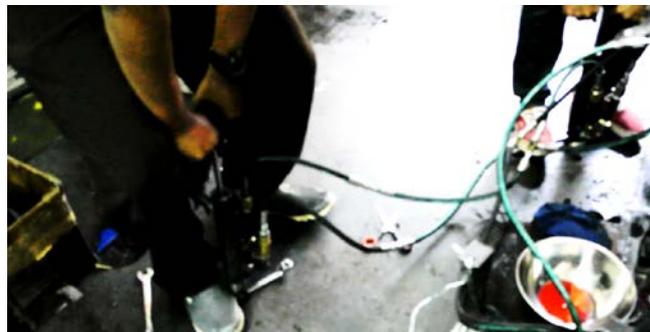
Keterangan gambar: (1) Accelerometer, (2) Amplifier, (3) Mutlimeter, (4) Oscilloscope, (5) Battery 12 volt, dan (6) Inverter DC to AC.
Gambar 4.17. Rangkaian elektronik pengambilan data HMERSA

Baterai 12 volt dipakai sebagai sumber tenaga listrik yang digunakan untuk menyalakan oscilloscope. Oscilloscope memerlukan tegangan AC 220 volt dan daya 40 watt, untuk itu diperlukan Inverter DC to AC yang berfungsi mengubah arus DC battery tegangan 12 volt menjadi arus AC tegangan 220 volt.

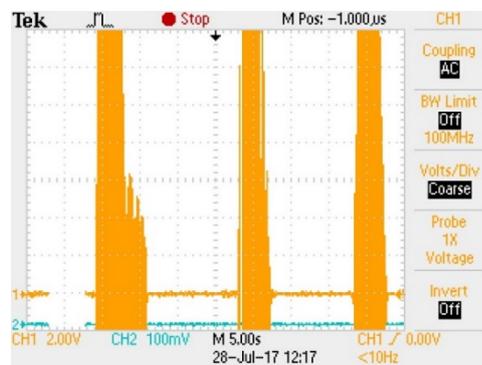
4.7. Hasil dan Analisa Data HMERSA

4.3.1. Hasil Pengambilan Data *Regenerative Energy* dengan Dipompa Tangan

Pengambilan data pada metode ini dilakukan dengan cara menekan shock absorber dengan tenaga manusia. Fluida yang tertekan dari shock absorber kemudian masuk ke motor hidrolis. Akibat hal tersebut gear motor hidrolis berputar sehingga generatorpun ikut berputar karena terhubung oleh *spur gear* untuk menghasilkan arus listrik. Proses pengambilan data ini seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.18. Selanjutnya dilakukan pengambilan data pada variasi selang waktu yang berbeda. Hasil yang diperoleh pada pengambilan data pertama seperti terlihat pada gambar 4.19.

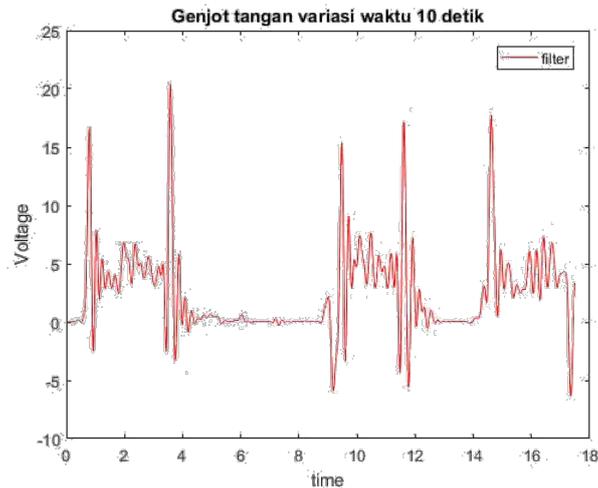


Gambar 4.18. Pengujian HMERSA dengan cara dipompa tangan



Gambar 4.19. Hasil pengukuran pada oscilloscope HMERSA dipompa tangan variasi pertama

Data yang didapatkan pada gambar 4.18 kemudian dilakukan filter *butterworth* pada *software* numerik. Hal ini dilakukan untuk melihat fluktuasi asli hasil pengukuran tanpa noise yang ada pada data pengukuran. Hasil filter tersebut ditunjukkan pada gambar 4.20.



Gambar 4.20. Hasil filter *butterworth* pada *software* numerik HMERSA dipompa tangan variasi pertama

Dari data tersebut diketahui nilai voltase tertinggi pada puncak pertama didapatkan data 20,36 volt, nilai tertinggi pada puncak kedua didapatkan data 17,17 volt, dan nilai tertinggi pada puncak ke 3 didapatkan data 17,67 volt. Sedangkan dari pengukuran data kuat arus, didapatkan data seperti pada tabel 4.4.

Tabel 4.4. Hasil pengukuran kuat arus pompa tangan variasi ke-1.

	Nilai Arus
Pemompaan 1	0,350 A
Pemompaan 2	0,310 A
Pemompaan 3	0,324 A

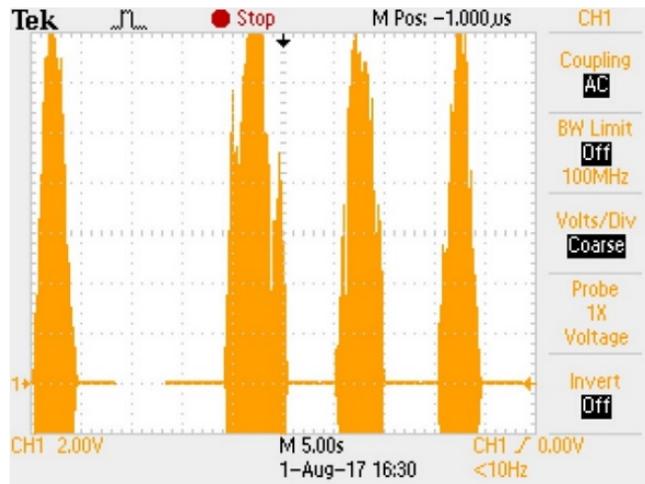
Setelah diketahui nilai tegangan dan kuat arus, maka untuk menghitung daya dengan menggunakan persamaan 4.1 sebagai berikut:

$$P = V \times I \quad (4.1)$$

Dimana, P adalah Daya yang diperoleh (watt), V adalah tegangan (volt), dan I adalah kuat arus (ampere). Sehingga daya yang diperoleh pada variasi genjot tangan

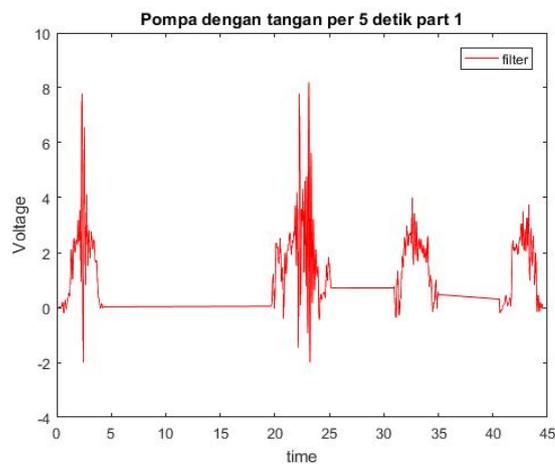
ke 2 selama selang waktu 10 detik sesuai dengan persamaan 4.1 adalah 7,126 watt, 5,322 watt, dan 5,725 watt.

Selanjutnya dilakukan pengambilan data pada variasi kedua selang waktu yang berbeda. Hasil yang diperoleh pada pengambilan data kedua seperti terlihat pada gambar 4.21.



Gambar 4.21. Hasil pengukuran pada oscilloscope HMERSA dipompa tangan variasi kedua

Data yang didapatkan pada gambar 4.21 kemudian dilakukan filter *butterworth* pada *software* numerik. Hal ini dilakukan untuk melihat fluktuasi asli hasil pengukuran tanpa noise yang ada pada data pengukuran. Hasil filter tersebut ditunjukkan pada gambar 4.22.



Gambar 4.22. Hasil filter *butterworth* pada *software* numerik HMERSA dipompa tangan variasi pertama

Dari data tersebut diketahui nilai voltase tertinggi pada puncak pertama didapatkan data 7,797 volt, nilai tertinggi pada puncak kedua didapatkan data 8,201 volt, nilai tertinggi pada puncak ke 3 didapatkan data 4 volt dan nilai tertinggi pada puncak ke 4 didapatkan data 3,739 volt. Sedangkan dari pengukuran data kuat arus, didapatkan data seperti pada tabel 4.5.

Tabel 4.5. Hasil pengukuran kuat arus pompa tangan variasi ke-2.

	Nilai Arus
Pemompaan 1	0,313 A
Pemompaan 2	0,323 A
Pemompaan 3	0,305 A
Pemompaan 4	0,309 A

Dengan menggunakan persamaan 4.1, maka daya yang diperoleh pada variasi kedua yakni: Pada Puncak pertama 2,44 watt, pada puncak kedua 2,648 watt, pada puncak ketiga 1,22 watt dan pada puncak keempat 1,155 watt.

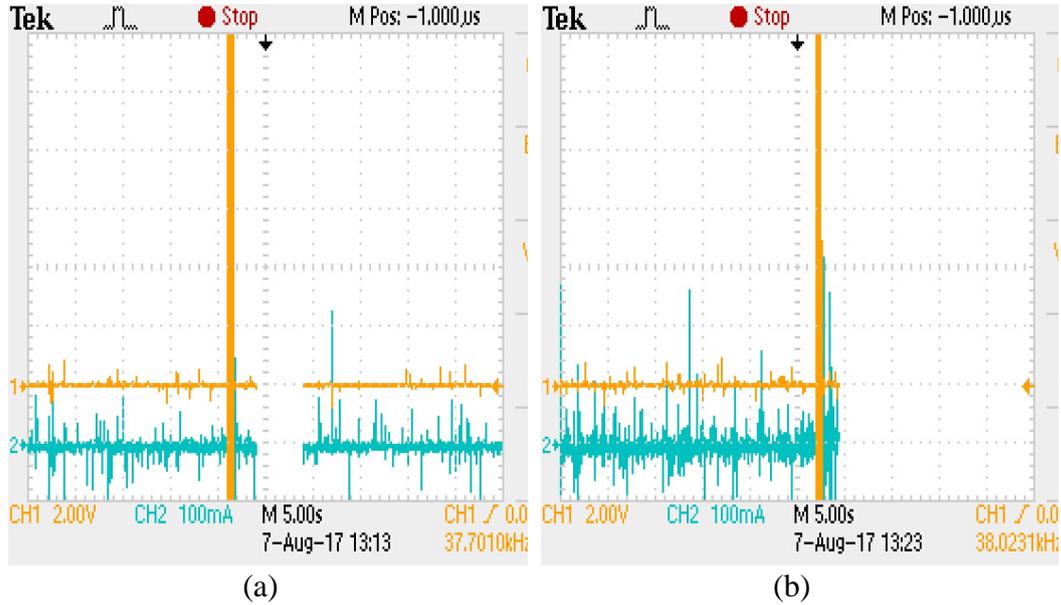
Analisa Data

Dari kedua variasi data tersebut, dapat dilihat bahwa semakin sedikit jeda waktu antar puncak, maka tegangan yang diperoleh semakin kecil namun nilai kuat arus relatif tetap diatas 0, 3 A. Akan tetapi jika ditinjau dari daya yang dihasilkan, maka semakin sedikit jeda waktu antar puncak, semakin kecil pula daya yang dihasilkan. Hal ini disebabkan karena waktu pengisian kembali tabung silinder berkurang, sehingga silinder belum terisi penuh. Kondisi ini menyebabkan tekanan yang dialami motor hidrolis menjadi relatif kecil untuk memutar generator.

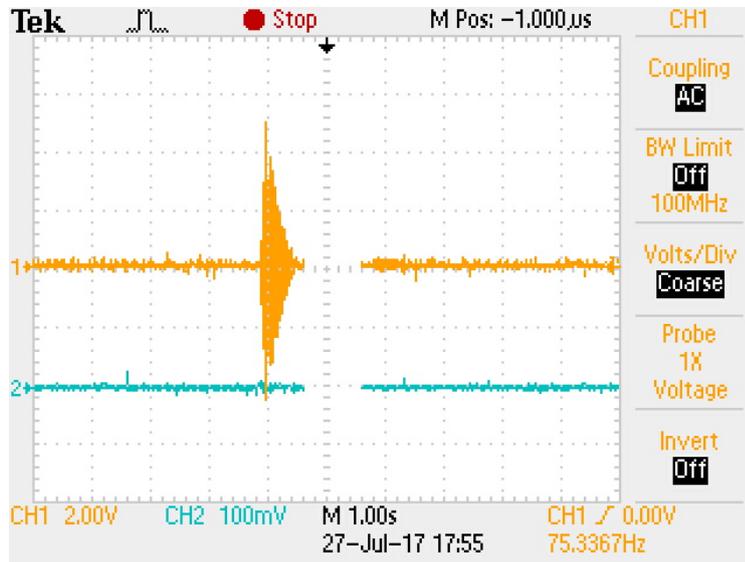
4.3.2. Hasil Pengambilan Data *Regenerative Energy* pada kendaraan

Pengambilan data pada kendaraan dilakukan dengan penempatan peralatan pada saat HMERSA diimplementasikan pada kendaraan. Motor hidrolis akan berputar dan memutar generator jika kendaraan melewati profil jalan yang tidak rata atau bumps yang ada di jalan. Pengambilan data dilakukan pada kendaraan saat melewati bumps dengan variasi kecepatan yang berbeda-beda. Hasil yang diperoleh

pada pengambilan data tegangan pada kendaraan diperlihatkan pada gambar 4.23 dan 4.24.



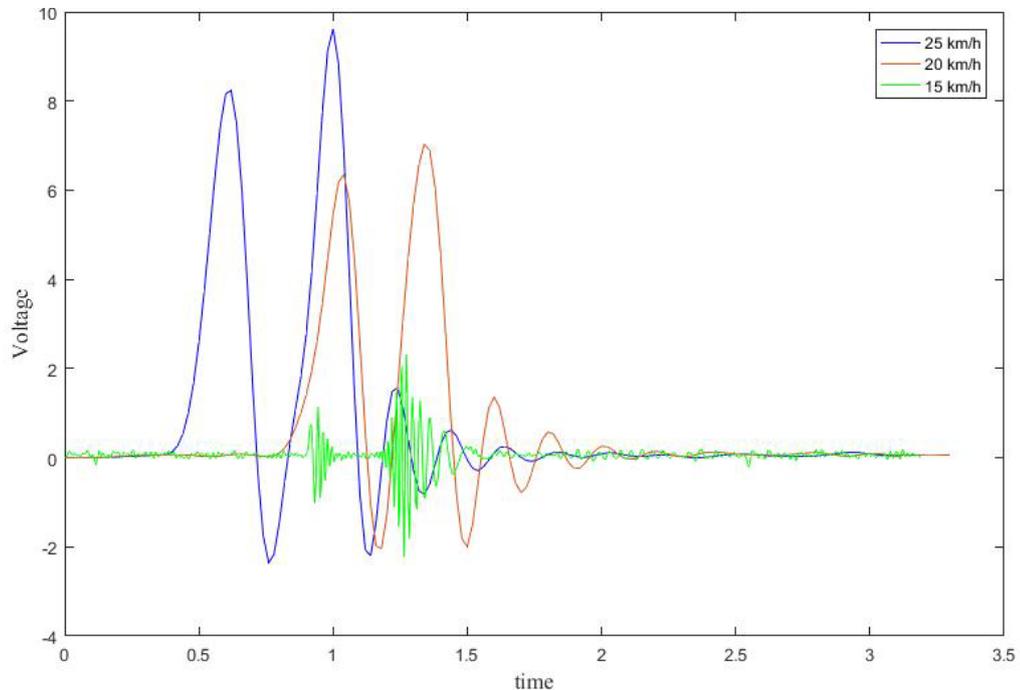
Gambar 4.23. Hasil Oscilloscope pada kecepatan (a) 25 km/jam dan (b) 20 km/jam



Gambar 4.24. Hasil Oscilloscope pada kecepatan 15 km/jam

Data yang didapatkan pada gambar 4.23 dan 4.24 kemudian dilakukan filter *butterworth* pada *software* numerik. Hal ini dilakukan untuk melihat fluktuasi asli

hasil pengukuran tanpa noise yang ada pada data pengukuran. Hasil filter tersebut ditunjukkan pada gambar 4.25.



Gambar 4.25. Hasil filter *butterworth* data tegangan HMERSA pada *software* numerik

Dari data 4.25 diketahui nilai voltase tertinggi pada kecepatan 25 km/h didapatkan data 9,614 volt, nilai tertinggi pada kecepatan 20 km/h didapatkan data 7,032 volt, dan nilai tertinggi pada kecepatan 15 km/h didapatkan data 2,153 volt. Sedangkan dari pengukuran data kuat arus, didapatkan data seperti pada tabel 4.5. Dengan menggunakan persamaan 4.1, maka daya yang diperoleh dari implementasi HMERSA pada kendaraan yakni: Pada kecepatan 25 km/h adalah 5,970 watt, pada kecepatan 20 km/h adalah 4,282 watt, dan pada kecepatan 15 km/h adalah 0,682 watt.

Tabel 4.6. Hasil pengukuran kuat arus implementasi HMERSA pada kendaraan.

Kecepatan Kendaraan	Nilai Arus
25 km/jam	0,621 A
20 km/jam	0,609 A
15 km/jam	0,317 A

Analisa Data

Dari data variasi tersebut, dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan kendaraan maka nilai tegangan dan kuat arus pada generator semakin besar. Hal ini terjadi karena kecapatan absorber dalam meredam lebih besar pada kecepatan tinggi saat melewati bumps. Hasil nilai tinggi pada puncak yang didapat pada gambar 4.21 dan 4.22 tidak bisa terus menerus, karena saat pengujian mobil hanya melewati satu bumps. Hal ini terjadi karena kami tidak bisa menemukan kondisi bumps dengan tinggi yg sama dalam jumlah rodayak. Adanya reservoir pada sistem membuat aliran masuk dan keluar oli menuju motor hidrolis menjadi lebih maksimal. Akan tetapi kondisi ini tidak bisa dipertahankan cukup lama pada saat kendaraan melaju pada kecepatan tinggi dan melewati bumps. Dikarenakan massa jenis oli yang rendah, maka aliran masuk ke tabung silinder menjadi lambat jika hanya mengandalkan gaya gravitasi. Hal ini menyebabkan ketidak seimrodagan antara oli yang masuk dan keluar dari reservoir, akibatnya reservoir cepat penuh dan silinder hidrolis kosong tanpa oli. Karena slinder hidrolis yang tidak terisi dengan baik, maka tidak ada tekanan pada motor hidrolis untuk memutar generator. Kondisi ini terjadi karena jedah waktu antara pengisian dan tekanan keluar silinder hidrolis terlalu pendek.

Pada penelitian Novian [8] sebelumnya, energi bangkitan yang didapatkan tanpa beban aki pada kecepatan 10 km/h mendapatkan 22 volt, 0,3178 A dan energi 2,47 watt sedangkan dengan beban aki mendapatkan 5 volt, 0,0909 A dan energi 0,15 watt. Hasil penelitian tersebut dicapai dengan menambahkan beban 244 kg pada kendaraan serta rectifier pengubah arus AC ke DC dan DC step up . Jika dibandingkan dengan penelitian saat ini, penelitian kami menggunakan kendaraan angkut tanpa penambahan beban pada kendaraan, rectifier dan DC Step UP pada sistem pengukuran energi bangkitan. Hasil yang dicapai pada kecepatan terendah yakni 15 km/h yakni 2,153 volt, 0,317 A dan energi 0,682 watt dengan beban lampu 12 volt AC dan energi 5 watt. Menurut kami hasil tersebut masih belum bisa dibandingkan, karena penelitian sebelumnya menggunakan analisa energi bangkitan pada kecepatan yang tidak sama serta rangkaian sistem pengukuran energi bangkitannya juga berbeda.

Untuk menghitung nilai efisiensi (η) antara simulasi dengan eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini, maka kami menghitungnya dengan menggunakan persamaan 4.2 sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{eks}}{P_{sim}} \times 100 \% \quad (4.2)$$

Dimana P_{eks} adalah daya yang dihasilkan pada analisa eksperimen dan P_{sim} adalah daya yang dihasilkan dari analisa simulasi HMERSA *half car*. Nilai P_{eks} didapatkan dari kecepatan 25 km/h eksperimen dan nilai P_{sim} didapatkan dari analisa simulasi HMERSA *half car* pada kecepatan yang sama. Sehingga dengan menggunakan persamaan 4.2 didapatkan hasil nilai efisiensi energi HMERSA-nya yakni 6,49 %.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan eksperimen implementasi *Hydro Magneto Electric Regenerative Shock Absorber* (HMERSA), maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain baru HMERSA telah dibuat. Desain ini telah mengalami pengembangan dan mendapatkan energi bangkitan yang lebih besar dari sebelumnya.
2. Pada hasil simulasi *half-car* sistem HMERSA dengan input sinusoidal, daya bangkitan terbesar berada pada beda fase 0° yakni 91,94 watt. Pada implementasi sistem HMERSA di kendaraan angkut, daya bangkitan semakin besar ketika kecepatan kendaraan bertambah saat melewati bumps.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah kami lakukan, saran kami dalam pengembangan penelitian kedepan yakni:

1. Karena sistem suplai fluida dari *reservoir tank* menuju silinder shock absorber menggunakan gaya gravitasi, maka perlu adanya perbedaan diameter pipa pada saluran masuk dan keluar shock absorber untuk memaksimalkan suplai fluida.
2. Perlu dilakukan pengukuran tekanan fluida untuk menentukan kekakuan pegas *spring check valve* di HMERSA. Hal ini diperlukan untuk menyesuaikan open-close check valve yang bekerja pada sistem dapat maksimal.
3. Pada penelitian selanjutnya, harap memperhatikan dimensi kendaraan dengan seksama. Sebaiknya peneliti menggunakan mobil riset. Hal ini dilakukan supaya peneliti dapat melakukan modifikasi pada chasis untuk penyesuaian sistem HMERSA.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Avadhany, P. Abel, V. Tarasov, and Z. Anderson, 'Regenerative Shock Absorber', US20090260935 A1, 22-Oct-2009..
- [2] Syuhri, Skriptyan N. H. dan Guntur, Harus L. (2015), "Studi Pengaruh Perubahan Tekanan Accumulator Terhadap Karakteristik Redaman dan Energi Listrik Bangkitan Pada Hydraulic Regenerative Shock Absorber (HRSA)", Seminar Nasional Teknik Mesin, Surabaya, hal. 12-18.
- [3] Kurniawan, Rian dan Guntur, Harus L., (2012), "Rancang Bangun Model Regenerative Shock Absorber (RSA) untuk Kendaraan Roda Empat", Jurnal Teknik POMITS, Vol. 1, No. 1, hal. 1-5.
- [4] Lin, Xu., Yang, Bo., Xuexun, Guo., (2010), "Simulation and Performance Evaluation of Hydraulic Transmission Electromagnetic Energy-Regenerative Active Suspension", Second WRI Global Congress Intelligent Systems, Intelligent System, Wuhan, hal. 58-61.
- [5] Yuxin Zhang, Xinjie Zhang, Min Zhan, Konghui Guo, Fuquan Zhao, Zongwei Liu., (2014), "Study On A Novel Hydraulic Pumping Regenerative Suspension For Vehicles", Journal of the Franklin Institute 352, hal. 485-499.
- [6] Zutao Zhang, Xingtian Zhang, Weiwu Chen, Yagubov Rasim, Waleed Salman, Pan Hongye, Yuan Yanping, Wang Chunbai, (2016), "A High-Efficiency Energy Regenerative Shock Absorber Using Supercapacitors For Renewable Energy Applications In Range Extended Electric Vehicle", Applied Energy 178, hal.177-188
- [7] Ruichen Wang, Gu fengshou, Cattley Robert, D. Ball Andrew (2016), "Modelling, Testing, and Analysis of a Regenerative Hydraulic Shock Absorber System", Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Volume 9 issue 5, hal 386.
- [8] Satria Fajar Novian, (2016), "Pengembangan Dan Analisa Hydro-Magneto-Electric Regenerative Shock Absorber (Hmersa) Dengan Dua Input Satu Output", Master Tesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [9] Li, Zhongjie., Zuo, Lei., Luhrs, George., (2013), "Electromagnetic Energy Harvesting Shock Absorber : Design, Modelling, and Rad Test". *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Vol. 62, No.3, hal. 1065-1074.

- [10] Peng Ming., Guo Xuexun., Zou Junyi., dan Zang Chengcai., (2016), “Simulation Study on Vehicle Road Performance with Hydraulic Electromagnetic Energy-Regenerative Shock Absorber”, SAE International by Wuhan Univ of Technology, China.
- [11] Rao, Singiresu S., (2004). “Mechanical Vibration Fifth Editon”, Pearson, Singapore.
- [12] Close Charles M, Frederick Dean K, Newell Jonathan C., “Modeling and Analysis of dynamic system Third edition” John Wiley & Sons, Inc, New York.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, Jawa Timur pada tanggal 15 Juli 1989, merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Mudjiyanto (Alm) dan Ibu Mukayah.

Penulis memulai pendidikan dasar di SD Muhammadiyah 10 Surabaya kemudian pindah ke SD Negeri 1 Sembayat Mayat Gresik, setelah merampungkan studi tingkat dasar kemudian melanjutkan studi menengah pertama di SMP Negeri 1 Bungah Gresik. Selanjutnya penulis melanjutkan studi ke

jenjang kejuruan di SMK Yasmu Manyar Gresik dengan konsentrasi Teknik Mekanik Otomotif dan menyelesaikan pendidikan SMK pada tahun 2007. Pada September 2009, penulis melanjutkan studi ke perguruan tinggi di Sekolah Tinggi Teknik Qomaruddin Gresik, Program Studi Teknik Mesin dan lulus pada September 2013. Pada September 2015, penulis melanjutkan studi Program Pascasarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin. Penulis tertarik pada bidang studi Desain Sistem Mekanik. Penulis menyelesaikan Tugas Akhir pada bidang pengembangan regeneratif energi terutama *regeneratif shock absorber*. Penulis akan selalu berusaha supaya ilmu yang telah diperoleh dapat bermanfaat bagi orang lain. Untuk mendapatkan informasi lebih lengkap dapat menghubungi penulis di mahardika.toni@gmail.com.