

Studi Eksperimen *Regenerative Shock Absorber* Dan Implementasi Pada Model *Half Car*

Elfrida Rizky Riadini^{1*}, Avicenna An Nizhami²

Jurusan Teknik Mesin, Program Studi Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Politeknik Negeri Semarang,
Kota Semarang, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin, Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang, Kota Semarang,
Indonesia

Email: ^{1*}elfrida.rizkyriadini@polines.ac.id, ²avicenna@polines.ac.id

(* : coresponding author)

Abstrak - Penelitian ini mengkaji potensi pemanfaatan energi dari getaran kendaraan melalui sistem regenerative shock absorber (RSA) berbasis mekanisme rack-pinion dan generator elektromagnetik. Studi ini terdiri dari dua tahapan utama: eksperimen pengujian RSA dan implementasinya ke dalam pemodelan numerik sistem suspensi model half car. Data hasil uji digunakan untuk memperoleh hubungan antara kecepatan translasi dengan gaya redaman, tegangan, dan arus listrik yang dihasilkan. Nilai rata-rata koefisien redaman sebesar 827,33 Ns/m digunakan dalam simulasi. Hasil menunjukkan bahwa tegangan dan arus tertinggi terjadi pada kecepatan 90 km/jam, seiring dengan amplitudo defleksi suspensi yang paling besar. Simulasi juga menunjukkan bahwa RSA tidak hanya mampu meredam getaran, tetapi juga berperan sebagai perangkat pemanen energi. Penelitian ini membuktikan efektivitas RSA sebagai solusi dua fungsi, yaitu peningkatan kenyamanan berkendara sekaligus konversi energi mekanik menjadi energi listrik.

Kata Kunci: *Regenerative Shock Absorber*, Energi Getaran, Model *Half Car*, Koefisien Redaman, Pemanen Energi

Abstract - This study investigates the potential of utilizing vehicle vibrations as an energy source through a regenerative shock absorber (RSA) system based on a rack-pinion mechanism and electromagnetic generator. The research comprises two main stages: experimental testing of the RSA and its implementation into a numerical half-car suspension model. Experimental data were used to establish the relationship between translational velocity, damping force, voltage, and current. The average damping coefficient obtained was 827.33 Ns/m and was applied in simulations. The results indicate that the highest voltage and current outputs occur at a speed of 90 km/h, which corresponds to the largest suspension deflection amplitude. Simulation outcomes also demonstrate that the RSA effectively functions as both a vibration damper and an energy harvester. This study confirms the dual-functionality of RSA systems in improving ride comfort while simultaneously converting mechanical energy into electrical energy.

Keywords: *Regenerative Shock Absorber*, Vibration Energy, Half Car Model, Damping Coefficient, Energy Harvesting

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah kendaraan di Indonesia menyebabkan meningkatnya permintaan terhadap sumber energi yang lebih efisien serta ramah lingkungan. Menanggapi hal tersebut, Pemerintah Indonesia mengeluarkan kebijakan melalui Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 guna mendorong implementasi energi bersih dan efisien [1]. Salah satu tantangan utama dalam penggunaan kendaraan roda empat adalah hilangnya sebagian besar energi selama operasional, yang berdampak pada rendahnya efisiensi energi secara keseluruhan. Berbagai pendekatan telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini. Penelitian oleh Ali et al. (2018) menunjukkan bahwa peningkatan performa sistem penggerak dapat dicapai melalui optimalisasi sistem pelumasan. Selain itu, sejumlah studi telah meneliti pemanfaatan energi terbuang, antara lain dari panas buangan (Zhao, 2013), energi kinetik selama proses pengereman (Pugi et al., 2017), serta energi yang hilang akibat disipasi getaran (Zuo & Zhang, 2013).

Penelitian ini mengkaji potensi pemanfaatan energi yang dihasilkan dari getaran kendaraan. Energi mekanis dalam bentuk vibrasi dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui dua pendekatan utama, yaitu metode elektromagnetik dan piezoelektrik (Kong et al., 2014). Sistem piezoelektrik multilapis telah diterapkan pada komponen suspensi sebagai sumber energi berkelanjutan dalam kendaraan (Hendrowati et al., 2012). Meskipun demikian, teknologi piezoelektrik umumnya lebih

efektif untuk menghasilkan energi dari getaran dengan amplitudo rendah (Abdelkareem et al., 2018). Sementara itu, pendekatan elektromagnetik dimanfaatkan dalam sistem suspensi melalui peredam yang tidak hanya meredam getaran, tetapi juga mengubahnya menjadi energi listrik. Sejumlah penelitian telah mengkaji berbagai mekanisme penghubung antara peredam regeneratif dan generator, termasuk penggunaan mekanisme rak dan pinion (Guo et al., 2016), mekanisme ulir bola (ball screw) (Shin et al., 2017), serta sistem berbasis hidrolik (Galluzzi et al., 2018).

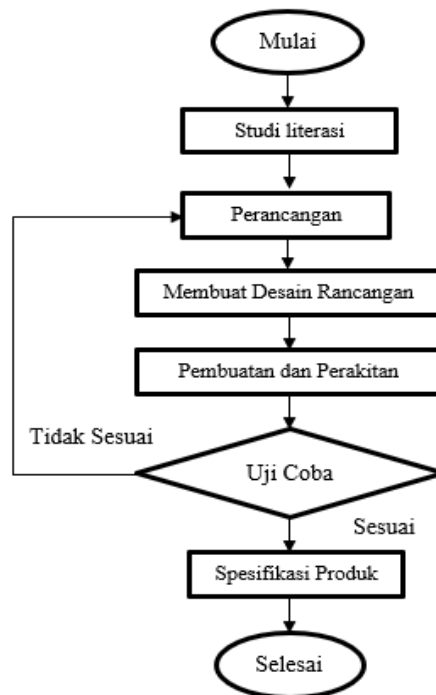
Di samping kemampuan sistem suspensi dalam memanen energi, aspek kenyamanan berkendara yang dipengaruhi oleh respons dinamis massa kendaraan akibat ketidakrataan permukaan jalan juga menjadi faktor penting dalam proses desain dan pemodelan suspensi. Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai penelitian telah difokuskan pada pengembangan sistem suspensi aktif dan semi-aktif untuk meningkatkan kinerja respons gerak kendaraan (Hrovatt, 1997). Studi yang dilakukan oleh Hassaan (2014) dan Andronic et al. (2014) memanfaatkan pendekatan *quarter car* dengan sistem suspensi pasif. Model tersebut kemudian disempurnakan oleh Ahmed & Svaricek (2014), yang mengembangkan suspensi aktif dengan integrasi sistem kontrol elektronik untuk mereduksi percepatan pada massa tergantung (*sprung mass*). Sementara itu, Ekoru & Pedro (2013) merancang sistem suspensi aktif berbasis aktuator hidrolik guna menstabilkan gerak dinamis massa tergantung. Suspensi aktif memang menunjukkan performa dinamis yang lebih unggul dibandingkan sistem semi-aktif, namun konsumsi energinya pun lebih tinggi. Model *sky-hook* (Emura et al., 1994) telah digunakan sebagai pendekatan dasar pada sistem suspensi adaptif. Hingga kini, kajian mengenai suspensi regeneratif dengan penerapan kedalam model numerik kendaraan masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini akan berfokus pada penerapan sistem suspensi regeneratif pada model setengah kendaraan, dengan tujuan menganalisis respons dinamis kendaraan serta energi yang dapat diekstraksi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji respons dinamis kendaraan roda empat yang dilengkapi dengan *regenerative shock absorber* serta mengevaluasi potensi energi yang dapat diekstraksi dari sistem tersebut. Rangkaian penelitian mencakup pengujian eksperimental serta implementasi hasilnya ke dalam model numerik kendaraan. Dalam simulasi, permukaan jalan direpresentasikan sebagai gangguan harmonik yang diterima oleh kendaraan, sementara model kendaraan yang digunakan adalah konfigurasi *half car*. Frekuensi eksitasi, yang merepresentasikan variasi kecepatan kendaraan, dijadikan sebagai parameter utama dalam analisis. Hubungan antara frekuensi eksitasi dan penggunaan peredam adaptif pada sistem suspensi semi-aktif akan dianalisis terhadap respons gerak kendaraan serta energi listrik yang dihasilkan.

2. METODE

2.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir kegiatan pelaksanaan yang digunakan dalam membuat rancang bangun *Shock Absorber Regenerative Sistem Rack Pinion dan Elektromagnetik* yaitu pada gambar 3.4 yang memerlukan beberapa tahapan dan analisis, sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Proses Perancangan

Berikut proses dalam merancang *Shock Absorber Regenerative* Sistem *Rack Pinion* dan *Elektromagnetik* sesuai dengan gambar 3.6 Diagram Alir Proses Perancangan :

a. Studi Literatur

Pada studi literatur meliputi proses mencari dan mempelajari bahan pustaka yang berkaitan dengan segala permasalahan mengenai perancangan mesin *Shock Absorber Regenerative* Sistem *Rack Pinion* dan *Elektromagnetik*. Studi literatur ini diperoleh dari berbagai sumber antara lain *textbook*, media internet, dan sumber bacaan lainnya.

b. Perancangan

Melakukan perhitungan berdasarkan rumus-rumus yang bersumber dari hasil studi literasi. Perhitungan yang dilakukan diantaranya perhitungan perancangan rack dan pinion, perhitungan bevel gear, perhitungan gaya reaksi pada poros, perhitungan perancangan diameter poros dan perhitungan perancangan bearing.

c. Membuat Desain Rancangan

Membuat desain rancangan berdasarkan perhitungan perancangan. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan sebuah mesin yang sesuai dengan fungsi dan kebutuhan setelah melakukan observasi dan studi literasi.

d. Pembuatan dan Perakitan

Pembuatan dan Perakitan meliputi mempersiapkan bahan material dan alat yang dibutuhkan dalam proses pembuatan *Shock Absorber Regenerative* Sistem *Rack Pinion* dan *Elektromagnetik* dengan pengaturan Generator DC yang nantinya dapat menghasilkan arus Output DC, proses pembuatan komponen-komponen, perakitan hingga finishing alat *shock absorber regenerative*.

e. Uji Coba

Langkah selanjutnya yaitu pengujian Alat, langkah ini dilakukan untuk mengetahui tingkat keberhasilan secara fungsional maupun operasional perancangan dan pembuatan

alat *regenerative shock absorber*. alat akan diperbaiki dan disempurnakan kembali jika ada kekurangan, sehingga tujuan pembuatan alat ini akan tercapai.

f. Spesifikasi Produk

Yang terakhir adalah spesifikasi produk, spesifikasi produk berisi tentang ukuran-ukuran dari komponen dalam bentuk nyata, serta terdapat evaluasi dan revisi dari alat. Setelah alat diuji maka harus diperbaiki kekurangannya sehingga menjadi alat sesuai dengan yang diinginkan.

2.2. Proses Pengujian

Proses pengujian merupakan suatu uji coba dari keberhasilan alat yang dirancang berdasarkan tujuan dan fungsi dari pembuatan alat tersebut. Proses pengujian penting untuk mengetahui apakah alat dapat berfungsi dengan baik, untuk mendapatkan data-data yang diperlukan guna mengetahui karakteristik dari alat tersebut. Apabila hasil pengujian masih ada kekurangan, maka alat ini dapat diperbaiki dan disempurnakan kembali hingga tujuan pembuatan alat shock absorber regenerative dapat tercapai.



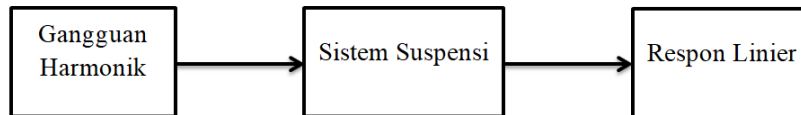
Gambar 2. Rangkaian Pengujian *Shock Absorber*

Langkah-langkah percobaan alat ini adalah sebagai berikut:

- Siapkan alat penguji *shock absorber* dan alat *shock absorber regenerative* yang akan diuji.
- Sambungkan alat penguji dengan sumber listrik.
- Setting alat penguji untuk melakukan pengujian alat *shock absorber regenerative*.
- Hidupkan alat penguji dengan cara menekan saklar on.
- Amati dan catat data yang diperoleh dari pengujian, data yang dicatat antara lain gaya redaman, arus, dan tegangan.
- Lakukan langkah 3 sampai 5 dengan kecepatan yang berbeda-beda.
- matikan alat penguji dengan cara menekan saklar off.
- Lepaskan alat *shock absorber regenerative* dari alat penguji.
- Putuskan alat penguji dengan sumber listrik.

2.3. Model Half Car

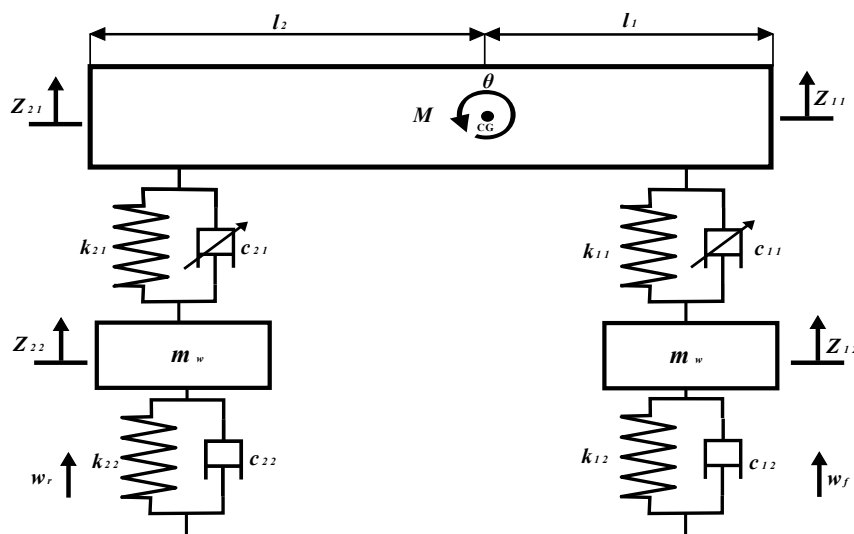
Block Diagram pada sistem *Shock Absorber regeneratif* ditunjukkan pada Gambar (2.13). Input dari sistem suspensi adalah eksitasi harmonik dari permukaan jalan yang direpresentasikan oleh gelombang sinusoidal. Block sistem *Shock Absorber regeneratif* menghasilkan respon gerak linier yaitu percepatan, kecepatan dan perpindahan dari sprung mass dan unsprung mass.



Gambar 3. Diagram Block Sistem Regenerative Shock Absorber (An-Nizhami, 2022)

Tabel 1. Simbol Dan Deskripsi Simbol Yang Digunakan Dalam Penelitian

Simbol	Deskripsi Simbol
M	<i>Sprung mass</i> [kg]
m	<i>Unsprung mass</i> [kg]
Z	<i>Displacement of sprung/unsprung mass</i> [m]
CG	<i>Center of gravity</i>
θ	<i>Angular displacement of sprung mass</i> [rad]
l	<i>Wheel and CG distance</i> [m]
k	<i>Suspension spring stiffness coefficient</i> [N/m]
C	<i>Suspension shock absorber damping coefficient</i> [N.s/m]
w	<i>Road disturbance</i> [m]
Cc	<i>Critical damping</i> [N.s/m]
ζ	<i>Damping ratio</i>



Gambar 4. Skema Pemodelan Suspensi Semi Aktif Regenerative dengan Model Half Car (An-Nizhami, 2022)

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

$$\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2)$$

Persamaan (1) dan (2) merepresentasikan bentuk persamaan diferensial, yang ditandai dengan penggunaan notasi titik pada variabel. Notasi satu titik mengindikasikan turunan pertama terhadap waktu atau persamaan diferensial orde satu, sedangkan dua titik menunjukkan turunan kedua, yang berarti persamaan diferensial orde dua. Sementara itu, sistem persamaan gerak dalam bentuk diferensial biasa dijabarkan pada Persamaan (3) hingga (7). Melalui penyelesaian sistem ini, diperoleh respons dinamis dari massa tergantung (*sprung mass*) dan massa tidak tergantung (*unsprung mass*).

$$k_{11}(z_{12} - z_{11} - \theta l_1) + c_{11}(\dot{z}_{12} - \dot{z}_{11} - \dot{\theta} l_1) - k_{21}(z_{22} - z_{21} - \theta l_2) - c_{21}(\dot{z}_{22} - \dot{z}_{21} - \dot{\theta} l_2) = l \ddot{\theta} \quad (3)$$

$$k_{11}(z_{12} - z_{11} - \theta l_1) + c_{11}(\dot{z}_{12} - \dot{z}_{11} - \dot{\theta} l_1) = M \ddot{z}_{11} \quad (4)$$

$$k_{12}(w_f - z_{12}) + c_{12}(\dot{w}_f - \dot{z}_{12}) - k_{11}(z_{12} - z_{11} - \theta l_1) - c_{11}(\dot{z}_{12} - \dot{z}_{11} - \dot{\theta} l_1) = M \ddot{z}_{11} \quad (5)$$

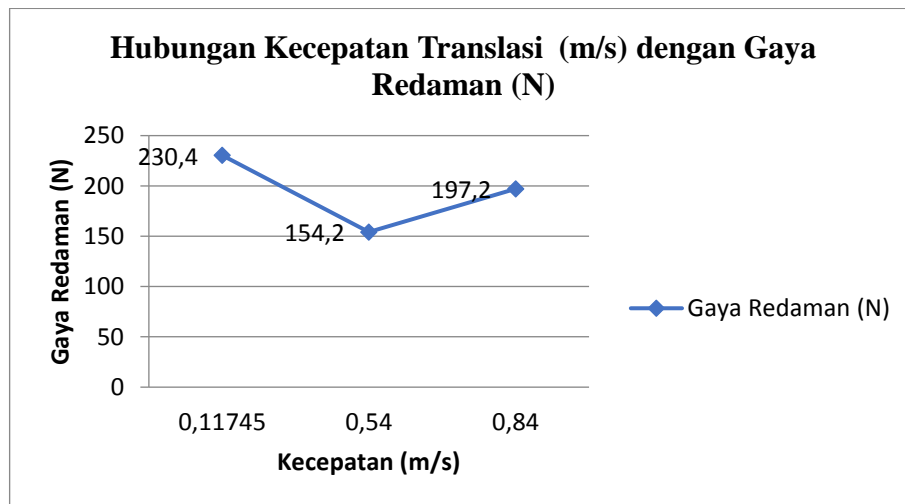
$$k_{21}(z_{22} - z_{21} - \theta l_2) + c_{21}(\dot{z}_{22} - \dot{z}_{21} - \dot{\theta} l_2) = M \ddot{z}_{21} \quad (6)$$

$$k_{22}(w_r - z_{22}) + c_{22}(\dot{w}_r - \dot{z}_{22}) - k_{21}(z_{22} - z_{21} - \theta l_2) - c_{21}(\dot{z}_{22} - \dot{z}_{21} - \dot{\theta} l_2) = M \ddot{z}_{22} \quad (7)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Eksperimen

Grafik hubungan antara kecepatan translasi *regenerative shock absorber* (m/s) secara alat uji dan secara manual dengan gaya peredam (N)



Gambar 5. Grafik hubungan Kecepatan Translasi dengan Gaya Redaman

Analisis terhadap damping ratio pada *regenerative shock absorber* dapat dilakukan melalui grafik yang menunjukkan hubungan antara kecepatan translasi (m/s) dan gaya redaman (N). Damping ratio merupakan parameter tak berdimensi yang menggambarkan seberapa cepat osilasi dalam suatu sistem mereda setelah mengalami gangguan. Umumnya, sistem mekanis akan berosilasi ketika mengalami penyimpangan dari keadaan setimbang, seperti yang terjadi pada sistem pegas dengan beban massa. Sebagai contoh, apabila massa ditarik lalu dilepaskan, maka akan terjadi gerakan naik-turun secara periodik, dan sistem tersebut akan berusaha kembali ke posisi setimbang setelah setiap osilasi. Nilai damping ratio diperoleh dengan membandingkan koefisien redaman aktual (C) terhadap koefisien redaman kritis (Cc). Untuk menentukan koefisien redaman (C),

dilakukan perhitungan rata-rata dari hasil beberapa pengujian. Adapun rumus yang digunakan untuk menentukan nilai koefisien redaman adalah sebagai berikut:

$$C = \frac{F_d}{V} \quad (8)$$

Keterangan :

C = koefisien redaman (Ns/m)

F_d = gaya redaman (N)

V = kecepatan translasi (m/s)

Didapatkan nilai dari masing-masing koefisien redaman setiap percobaan sebagai berikut :

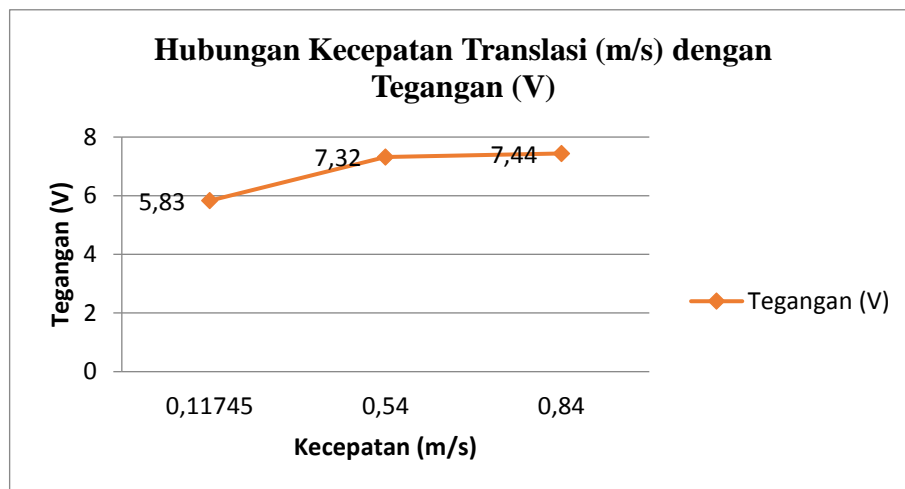
$$C_1 = \frac{F_{d1}}{V_1} = \frac{230,4 \text{ N}}{0,11745 \text{ m/s}} = 1961,68 \text{ (Ns/m)}$$

$$C_2 = \frac{F_{d2}}{V_2} = \frac{154,2 \text{ N}}{0,54 \text{ m/s}} = 285,56 \text{ (Ns/m)}$$

$$C_3 = \frac{F_{d3}}{V_3} = \frac{197,2 \text{ N}}{0,84 \text{ m/s}} = 234,76 \text{ (Ns/m)}$$

Maka rata-rata koefisien redamannya, yaitu :

$$C = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{\text{Jumlah Pengujian}} = \frac{1961,68 + 285,56 + 234,76}{3} = 827,33 \text{ (Ns/m)}$$



Gambar 6. Grafik Hubungan Kecepatan Translasi dengan Tegangan

Melalui proses pemodelan data menggunakan pendekatan sum of least squares, hubungan antara kecepatan translasi (m/s) dan tegangan dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan matematis. Nilai-nilai hasil pengujian dimasukkan ke dalam perangkat lunak untuk memperoleh kurva terbaik yang merepresentasikan keterkaitan kedua variabel tersebut. Berdasarkan hasil pemrosesan data, diperoleh persamaan yang menggambarkan hubungan antara kecepatan translasi (m/s) dan tegangan sebagai berikut:

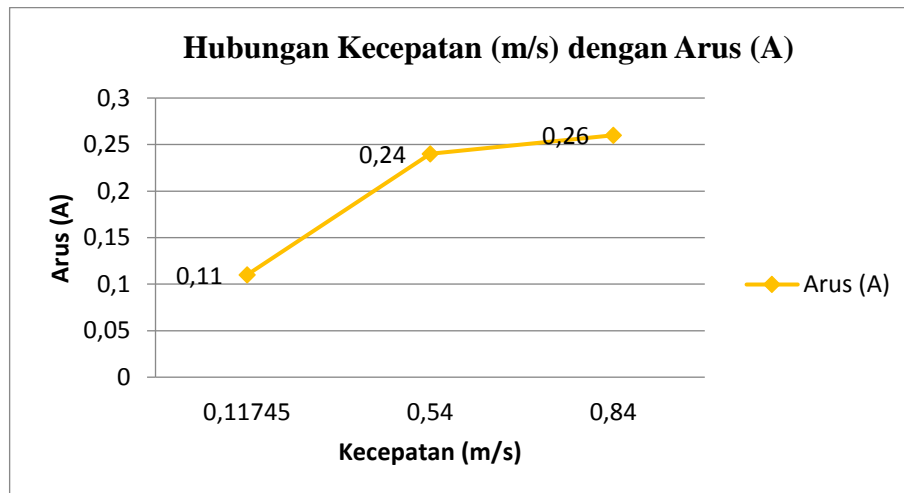
$$Volt = -4,3188 \cdot V^2 + 6,3599 \cdot V + 5,1450$$

Keterangan :

Volt = Tegangan (V)

V = Kecepatan Translasi (m/s)

Secara teoritis, terdapat hubungan linier antara kecepatan translasi pada regenerative shock absorber (RSA) dalam satuan m/s dan tegangan listrik yang dihasilkan (V). Hasil pengujian kinerja RSA mendukung asumsi teoritis tersebut, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5.6. Pada pengujian pertama, ketika kecepatan translasi RSA mencapai 0,11745 m/s, tercatat tegangan sebesar 5,83 V. Selanjutnya, pada pengujian kedua dengan kecepatan 0,54 m/s, tegangan yang dihasilkan meningkat menjadi 7,32 V. Pada pengujian ketiga, dengan kecepatan translasi 0,84 m/s, nilai tegangan yang tercatat adalah 7,44 V. Temuan ini mengonfirmasi bahwa peningkatan kecepatan translasi RSA berkorelasi positif terhadap kenaikan tegangan yang dihasilkan, sesuai dengan prediksi teoritis.



Gambar 7. Grafik hubungan Kecepatan dengan Arus

Melalui pendekatan data fitting, dapat diperoleh persamaan yang merepresentasikan hubungan antara kecepatan translasi (m/s) dan arus listrik (A). Nilai-nilai yang diperoleh dari hasil pengujian dimanfaatkan untuk membentuk model empiris yang menggambarkan keterkaitan kedua parameter tersebut. Berdasarkan hasil pemodelan, persamaan empiris yang menggambarkan hubungan antara kecepatan translasi dan arus listrik disajikan sebagai berikut:

$$Current = -0.3329 \cdot V^2 + 0.5260 \cdot V + 0.0530$$

Keterangan :

Current = Arus (A)

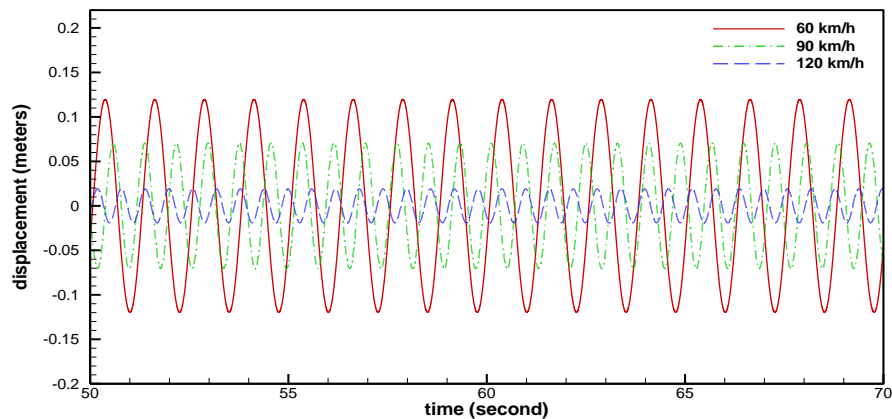
V = Kecepatan Translasi (m/s)

Secara teoritis nilai kecepatan translasi RSA (m/s) berbanding lurus dengan Arus (A). Berdasarkan uji kinerja *regenerative shock absorber* didapatkan data seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.7 Data yang didapatkan sesuai dengan teoritis, pada pengujian 1 dengan kecepatan translasi RSA sebesar 0,11745 m/s didapatkan nilai tegangan sebesar 0,11 A, pada percobaan 2 dengan kecepatan translasi RSA 0,54 m/s didapatkan nilai tegangan sebesar 0,24 A, dan pada percobaan 3 dengan kecepatan translasi RSA 0,84 m/s didapatkan nilai tegangan sebesar 0,26 A. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan translasi RSA (m/s) perbanding lurus dengan Arus (A).

3.2. Pemodelan Dinamika Kendaraan Menggunakan *Regenerative Shock Absorber*

Untuk mengetahui pengaruh kecepatan kendaraan terhadap perpindahan, tegangan dan arus pada *regenerative shock absorber* ini dilakukan dengan cara mensimulasikan *regenerative shock absorber* pada pemodelan sistem suspensi pada aplikasi matlab. Sehingga dapat menggantikan pengujian *regenerative shock absorber* yang dipasang pada kendaraan mobil listrik. Caranya dengan memasukan nilai koefisien redaman *regeneratif shock absorber* (*C*) yang telah didapatkan pada pemodelan suspensi pada aplikasi matlab, sedangkan variabel yang digunakan adalah kecepatan kendaraan. Sehingga akan mendapatkan pengaruh kecepatan kendaraan terhadap perpindahan,

tegangan, dan arus pada *regenerative shock absorber* dalam bentuk grafik. Berikut grafik pengaruh kecepatan kendaraan terhadap perpindah, tegangan dan arus pada *regenerative shock absorber* :

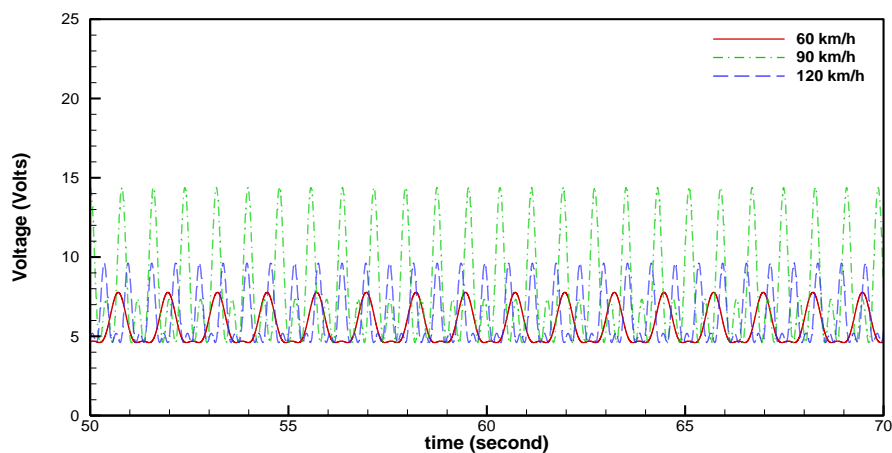


Gambar 8. Grafik Pengaruh Kecepatan Kendaraan (m/s) dengan Perpindahan (m)

Gambar yang ditampilkan merupakan hasil simulasi dari model numerik half car yang memanfaatkan data koefisien redaman hasil pengujian pada *regenerative shock absorber* (RSA). Grafik memperlihatkan respons perpindahan vertikal kendaraan terhadap waktu untuk tiga variasi kecepatan, yaitu 60 km/jam (garis merah), 90 km/jam (garis hijau), dan 120 km/jam (garis biru).

Berdasarkan hasil simulasi, terlihat bahwa terdapat perbedaan signifikan dalam amplitudo perpindahan vertikal (displacement) akibat perubahan kecepatan. Pada kecepatan 60 km/jam, kendaraan menunjukkan respons perpindahan terbesar, yang ditandai dengan amplitudo osilasi tertinggi. Sebaliknya, pada kecepatan 120 km/jam, amplitudo osilasi mengalami penurunan yang cukup signifikan.

Penurunan amplitudo seiring dengan meningkatnya kecepatan kendaraan dapat dijelaskan melalui karakteristik sistem suspensi berbasis redaman regeneratif yang digunakan dalam model. Redaman yang lebih besar tercapai pada kecepatan translasi tinggi, yang secara efektif menyerap energi getaran dan mengurangi respons gerak vertikal. Hal ini menunjukkan bahwa *regenerative shock absorber* tidak hanya mampu memanen energi, tetapi juga secara efektif meningkatkan kenyamanan berkendara melalui pengendalian osilasi pada kecepatan tinggi.



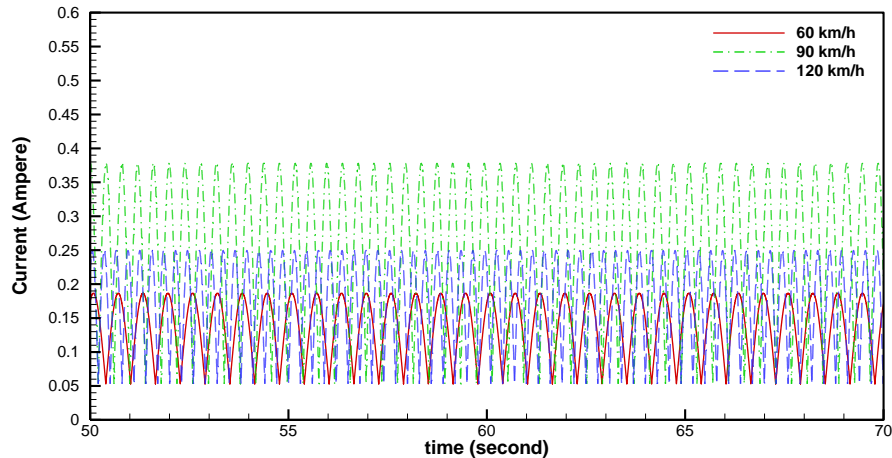
Gambar 9. Grafik Pengaruh Kecepatan Kendaraan (m/s) dengan Tegangan (V)

Gambar yang disajikan menunjukkan profil tegangan listrik (dalam satuan Volt) yang dihasilkan oleh regenerative shock absorber (RSA). Hasil simulasi memperlihatkan bahwa kecepatan 90 km/jam menghasilkan tegangan tertinggi dibandingkan dua kecepatan lainnya. Fenomena ini mengindikasikan adanya keterkaitan langsung antara defleksi suspensi dengan tegangan yang dihasilkan. Pada kecepatan 90 km/jam, respons vertikal kendaraan—khususnya defleksi suspensi—mencapai nilai maksimum, sehingga gaya redaman yang bekerja lebih besar dan menghasilkan tegangan listrik yang lebih tinggi.

Sebaliknya, pada kecepatan 120 km/jam, meskipun nilai kecepatan translasi lebih tinggi, amplitudo tegangan cenderung lebih rendah daripada pada kecepatan 90 km/jam. Hal ini disebabkan oleh karakteristik dinamis suspensi yang menunjukkan penurunan defleksi pada kecepatan tinggi akibat peningkatan gaya redaman yang bekerja lebih efisien dalam meredam osilasi. Dengan kata lain, meskipun energi kinetik kendaraan lebih tinggi pada 120 km/jam, sistem RSA justru menghasilkan tegangan yang lebih rendah karena defleksi suspensi relatif lebih kecil.

Pada kecepatan 60 km/jam, tegangan yang dihasilkan berada pada nilai terendah, sejalan dengan rendahnya frekuensi dan amplitudo osilasi sistem suspensi. Hal ini juga mencerminkan bahwa performa RSA sebagai sistem pemanen energi sangat tergantung pada besarnya defleksi suspensi yang terjadi, bukan hanya kecepatan translasi kendaraan secara langsung.

Temuan ini penting untuk mengidentifikasi titik kerja optimal dari regenerative shock absorber. Kecepatan 90 km/jam dapat dikatakan sebagai kondisi ideal dari segi output energi, karena menghasilkan defleksi suspensi yang cukup besar namun masih dalam batas operasional sistem redaman. Oleh karena itu, desain dan pengaturan sistem suspensi semi-aktif berbasis RSA sebaiknya disesuaikan agar performanya dioptimalkan pada rentang kecepatan ini, khususnya untuk aplikasi kendaraan yang beroperasi pada kecepatan menengah.



Gambar 10. Grafik Pengaruh Kecepatan Kendaraan (m/s) dengan Arus (A)

Gambar di atas menggambarkan profil arus listrik (dalam satuan Ampere) sebagai fungsi waktu yang dihasilkan oleh sistem regenerative shock absorber (RSA) pada model half car. Secara umum, pola distribusi arus listrik yang ditunjukkan pada grafik ini menunjukkan kesesuaian yang konsisten dengan karakteristik tegangan listrik yang telah dibahas sebelumnya. Pada kecepatan 90 km/jam (garis hijau), arus listrik yang dihasilkan mencapai nilai maksimum dibandingkan dengan kecepatan lainnya, yaitu berkisar di sekitar 0,35 hingga 0,4 Ampere. Kondisi ini mencerminkan bahwa defleksi suspensi terbesar terjadi pada kecepatan tersebut, sehingga menghasilkan gaya redaman lebih tinggi dan berdampak langsung terhadap peningkatan arus listrik yang dihasilkan oleh sistem RSA.

Pada kecepatan 120 km/jam (garis biru), meskipun terjadi peningkatan kecepatan gerak vertikal, arus yang dihasilkan justru lebih rendah dari kondisi 90 km/jam. Hal ini sejalan dengan

penurunan amplitudo defleksi suspensi pada kecepatan tinggi, yang menyebabkan penurunan gaya redaman, dan pada akhirnya mengurangi arus listrik yang dihasilkan. Sebaliknya, pada kecepatan 60 km/jam (garis merah), nilai arus terpantau paling rendah di antara ketiganya, hal ini dapat dijelaskan oleh osilasi suspensi yang relatif kecil pada kecepatan rendah.

Korelasi antara arus dan tegangan yang dihasilkan RSA tampak sangat erat dalam hasil simulasi ini, baik dari segi amplitudo maupun pola temporalnya. Pola arus menunjukkan fluktuasi periodik yang mengikuti siklus getaran kendaraan secara harmonik, yang identik dengan pola tegangan. Hal ini mengindikasikan bahwa kedua parameter tersebut bergantung langsung pada tingkat defleksi suspensi dan kinerja redaman dinamis yang terjadi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan menguji regenerative shock absorber (RSA) berbasis mekanisme rack-pinion dan elektromagnetik untuk kendaraan roda empat. Dari hasil pengujian eksperimental, diketahui bahwa terdapat hubungan linier antara kecepatan translasi dengan gaya redaman, tegangan, dan arus listrik yang dihasilkan. Nilai rata-rata koefisien redaman yang diperoleh sebesar 827,33 Ns/m. Selain itu, pemodelan sistem suspensi half car yang menggunakan data eksperimen menunjukkan bahwa RSA tidak hanya berfungsi dalam meredam getaran, tetapi juga mampu menghasilkan energi listrik secara efektif. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan dan arus maksimum dihasilkan pada kecepatan 90 km/jam, yang berkorelasi dengan defleksi suspensi tertinggi. Oleh karena itu, kecepatan tersebut dapat dianggap sebagai titik kerja optimal dari sistem RSA. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap desain sistem suspensi semi-aktif yang tidak hanya meningkatkan kenyamanan berkendara, tetapi juga berpotensi dalam pemanenan energi dari getaran kendaraan.

REFERENCES

- Abdelkareem, M. A. A., Xu, L., Ali, M. K. A., Elagouz, A., Mi, J., Guo, S., Liu, Y., & Zuo, L. (2018). Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review. In *Applied Energy* (Vol. 229, pp. 672–699). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.030>
- Ahmed, M. M., & Svaricek, F. (2014). Preview optimal control of vehicle semi-active suspension based on partitioning of chassis acceleration and tire load spectra. *2014 European Control Conference, ECC 2014*, 1669–1674. <https://doi.org/10.1109/ECC.2014.6862615>
- Ali, M. K. A., Xianjun, H., Abdelkareem, M. A. A., Gulzar, M., & Elsheikh, A. H. (2018). Novel approach of the graphene nanolubricant for energy saving via anti-friction/wear in automobile engines. *Tribology International*, 124, 209–229. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2018.04.004>
- Andronic, F., Mihai, I., Manolache-Rusu, I.-C., Ptuleanu, L., & Radion, I. (2014). SIMULATING PASSIVE SUSPENSION ON AN UNEVEN TRACK SURFACE. *Journal of Engineering Studies and Research*, 20(1).
- Bing Kong, Tao Li Huey, Hoon Hng, Freddy Boey, Tianshu Zhang, Sean Li, L. (2014). Lecture Notes in Energy 24 Waste Energy Harvesting Mechanical and Thermal Energies. In *Energy Technology* (Vol. 24, Issue 1). <http://www.springer.com/series/8874>
- Ekoru, J. E. D., & Pedro, J. O. (2013). Proportional-integral-derivative control of nonlinear half-car electro-hydraulic suspension systems. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 14(6), 401–416. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1200161>
- Emura, J., Kakizaki, S., Yamaoka, F., & Nakamura, M. (1994). Development of the Semi-Active Suspension System Based on the Sky-Hook Damper Theory. *SAE Transactions*, 103, 1110–1119. <http://www.jstor.org/stable/44611825>
- Galluzzi, R., Xu, Y., Amati, N., & Tonoli, A. (2018). Optimized design and characterization of motor-pump unit for energy-regenerative shock absorbers. *Applied Energy*, 210, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.100>
- Guo, S., Liu, Y., Xu, L., Guo, X., & Zuo, L. (2016). Performance evaluation and parameter sensitivity of energy-harvesting shock absorbers on different vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 54(7), 918–942. <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1174276>
- Hassaan, G. A. (2014). Car Dynamics using Quarter Model and Passive Suspension, Part I: Effect of Suspension Damping and Car Speed. *International Journal of Computer Techniques*, 1. <http://www.ijctjournal.org>
- Hendrowati, W., Guntur, H. L., & Sutantra, I. N. (2012). Design, Modeling and Analysis of Implementing a Multilayer Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Mechanism in the Vehicle Suspension.

- Engineering*, 04(11), 728–738. <https://doi.org/10.4236/eng.2012.411094>
- Hrovatt, D. (1997). Survey of Advanced Suspension Developments and Related Optimal Control Applications*. *Automatica*, 33(10), 1781–1817.
- Pugi, L., Pagliai, M., Nocentini, A., Lutzemberger, G., & Pretto, A. (2017). Design of a hydraulic servo-actuation fed by a regenerative braking system. *Applied Energy*, 187, 96–115. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.047>
- Shin, S. S., Kim, B. S., Lee, D. W., & Kwon, S. J. (2017). Vehicle dynamic analysis for the ball-screw type energy harvesting damper system. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 415 LNEE, 853–862. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50904-4_86
- Zhao, D. (2013). Waste thermal energy harvesting from a convection-driven Rijke–Zhao thermo-acoustic-piezo system. *Energy Conversion and Management*, 66, 87–97. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2012.09.025>
- Zuo, L., & Zhang, P. S. (2013). Energy harvesting, ride comfort, and road handling of regenerative vehicle suspensions. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 135(1). <https://doi.org/10.1115/1.4007562>