

Pemodelan dan Analisis Karakteristik Dinamis *Regenerative Swing Arm* pada Scooter

Pradhana Rizki Wibowo dan Harus Laksana Guntur
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: haruslg@me.its.ac.id

Abstrak—Energi pada kendaraan sepeda motor tidak semuanya digunakan untuk menggerakkan sepeda motor tersebut. Menurut data dari Departemen Energi Amerika (2014), hanya sekitar 12%-30% dari energi bahan bakar yang dikonversikan pada kendaraan perkotaan. Energi yang terbuang dapat berupa energi panas pada mesin, elektrik, transmisi, dan getaran. Guna meningkatkan efisiensi kendaraan, maka dilakukan perancangan dan simulasi dari *Regenerative Swing Arm* (RSA) yaitu sebuah sistem *Regenerative Shock Absorber* dengan memanfaatkan transmisi dengan *spur gear* pada *swing arm* belakang sepeda motor untuk memanfaatkan energi terbuang pada bagian suspensi dengan cara memanfaatkan gerakan putar dari *swing arm* sepeda motor. Selanjutnya Gerakan putar tersebut disalurkan melalui *spur gear* yang dilengkapi dengan *oneway clutch* untuk menggerakkan generator sehingga generator menghasilkan listrik yang kemudian dapat disimpan untuk keperluan kendaraan. Karakteristik dari SA-RSA didapatkan dari hasil simulasi menggunakan MATLAB dan SIMULINK. Variasi yang digunakan adalah variasi jalan, digunakan dua variasi. Variasi pertama berupa *random input* dengan eksitasi jalan kelas A dengan variasi kecepatan sebesar 40km/h, 60km/h dan 80km/h. Variasi kedua merupakan input sinusoidal dengan amplitudo sebesar 10cm dan variasi frekuensi sebesar 1Hz, 1,5Hz dan 2Hz. RMS daya bangkitan, tegangan dan kuat arus paling besar dihasilkan pada saat diberi eksitasi sinusoidal dengan frekuensi 1 hz sebesar $6,058 \times 10^{-8}$ Watt; $2,461 \times 10^{-4}$ Volt; dan $1,44 \times 10^{-6}$ Ampere. RMS percepatan vertikal terbesar pada system suspensi standar terjadi ketika diberi eksitasi sinusoidal dengan frekuensi 1hz sebesar $0,1256 \text{ m/s}^2$, sedangkan pada sistem yang diberi RSA terjadi ketika diberi eksitasi sinusoidal dengan frekuensi 1hz dan hambatan 1ohm yaitu sebesar $0,09879 \text{ m/s}^2$.

Kata Kunci—*Regenerative Swing Arm*, Skuter, *Swing Arm*, *Energy Harvesting*.

I. PENDAHULUAN

MENURUT data dari jurnal ESDM tahun 2019, konsumsi energi di Indonesia mencapai 411,6 juta ton minyak pada tahun 2018 dimana sektor transportasi menyumbang konsumsi energi total di Indonesia sebesar 40% kemudian diikuti oleh sektor lain. Menurut data dari Departemen Energi Amerika (2014), hanya sekitar 12%-30% dari energi bahan bakar yang dikonversikan pada kendaraan perkotaan. Artinya terdapat sekitar 70% hingga 88% energi yang terbuang [2]. Energi yang terbuang dapat berupa energi panas pada mesin, elektrik, transmisi, dan getaran.

Beberapa negara telah melakukan pengembangan energi terbarukan dari energi buangan transportasi. Salah satunya adalah memanfaatkan energi yang terbuang (terdisipasi) pada sistem suspensi kendaraan melalui *shock absorber*. Pada umumnya transportasi saat ini menggunakan konvensional *shock absorber* dimana terdapat mekanisme hidrolik yang mampu meredam getaran dan energi redaman yang

dihasilkan akan terbuang menjadi panas. Maka dari itu perlu dilakukannya penelitian pada kendaraan untuk memanfaatkan energi yang terbuang, yaitu RSA (*Regenerative Swing Absorber*) mampu memulihkan energi getaran yang terbuang pada sistem suspensi kendaraan menjadi energi listrik.

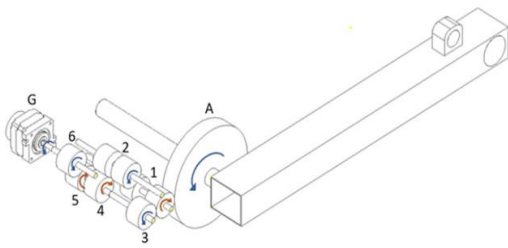
Beberepa peneliti telah menganalisa mengenai potensi energi yang terdapat pada sistem suspensi kendaraan. Namun belum ada penelitian RSA yang mengarah pada aplikasi untuk Sepeda Motor. Desain RSA dapat dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu linier dan *rotary*. Linier RSA mengubah gerakan naik turun suspensi secara langsung melalui linier magnet untuk menghasilkan energi listrik. Sedangkan *rotary* RSA mengubah gerak naik turun suspensi menjadi gerak rotasional untuk selanjutnya dihubungkan dengan generator dan menghasilkan listrik. Tang dkk (2014) mendesain dari linier RSA. Metode linier *electromagnetic absorber* mengubah energi kinetik menjadi energi listrik [5]. Energi dapat dihasilkan dari suspensi kendaraan oleh penggunaan kembali atau penyimpanan energi osilasi kendaraan. Jika digunakan sebagai peredam kejut, gerakan relatif antara magnet dan rakitan koil menghasilkan daya listrik. Generator linier mencakup bagian utama yang terdiri dari lilitan koil dan bagian sekunder yang terdiri dari cincin magnet yang disusun. Selama kendaraan berjalan, susunan cincin magnet bergerak secara linier didalam kumparan koil. Karena gerakan linier dari cincin magnet didalam kumparan koil, tegangan AC akan terinduksi dalam koil. Tegangan ini kemudian diperbaiki dan dapat memasok baterai atau perangkat listrik lain. (R.A. Oprea, 2012).

Zhongjie Lie (2017) melakukan penelitian terhadap *Rotary* RSA. Model RSA Jenis *rotary* yang digunakan pada sistem ini adalah *rack pinion*, dimana *rack pinion* akan bergerak sejalan dengan naik turunnya suspensi pada kendaraan. Gerakan *rack pinion* akan diubah 90 derajat dengan sepasang roda gigi yang terhubung. Energi *rack pinion* memiliki daya bangkitan maksimum sebesar 67.5 W dan daya bangkitan rata-rata 19.2 W [6].

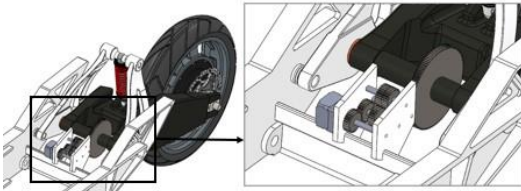
Penelitian lain mengenai RSA dilakukan oleh Sakti Priyanto (2019) mampu mengembangkan prototip RSA *Spur gear* yang dapat menyerap energi saat siklus kompresi maupun ekspansi sehingga dapat menghasilkan energi bangkitan yang lebih berkelanjutan dengan tegangan bangkitan maksimum yang dapat dihasilkan sebesar 9.11 V pada saat melewati polisi tidur dengan kecepatan 20 km/jam.

II. URAIAN PENELITIAN

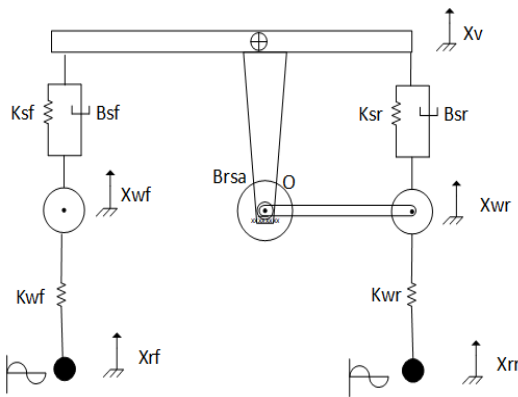
Penelitian ini berfokus pada *simulasi* RSA pada *swing arm skuter elektrik*. Data yang akan diamati adalah daya bangkitan dan respon dinamis kendaraan yang berupa percepatan



Gambar 1. Ilustrasi roda gigi sistem RSA.



Gambar 2. Mekanisme RSA pada skuter elektrik.



Gambar 3. Free Body diagram mekanisme RSA pada skuter elektrik.

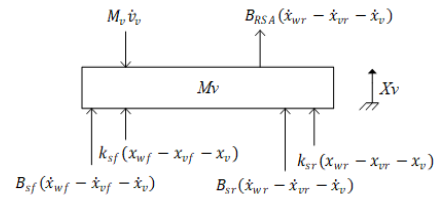
vertikal kendaraan. Simulasi dilakukan melewati beberapa eksitasi jalan dengan variasi kecepatan dan juga variasi hambatan. Variasi pertama adalah 1 hz, 1,5 hz dan 2 hz dengan eksitasi Sinusoidal. Kemudian untuk variasi kedua yaitu 40 km/jam, 60 km/jam, dan 80 km/jam pada saat melewati jalan kelas A. Sedangkan untuk variasi hambatan sebesar 1 ohm, 5 ohm, dan 10 ohm.

Dalam pelaksanaannya hal pertama yang dilakukan dalam simulasi RSA *swing arm* adalah menentukan parameter RSA diantaranya diameter roda gigi, inersia roda gigi, dan konstanta generator. Kemudian, dilakukan perancangan mekanisme RSA dan pembuatan model dinamis RSA. Setelah didapat model dinamis RSA, maka selanjutnya mensimulasikan model dinamis yang dibuat menggunakan software MATLAB dan SIMULINK. Kemudian data diambil sesuai kebutuhan.

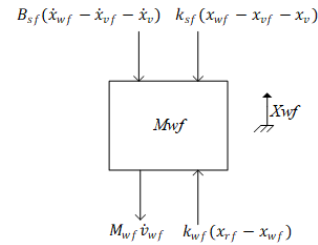
A. Penentuan Parameter

Untuk parameter damping dan konstanta *stiffnes* menggunakan data dari penelitian sebelumnya tentang “pemodelan dan analisis pengaruh perubahan parameter *variable orifice* sistem suspensi hidrolik terhadap gaya redam yang dihasilkan dan respon dinamis penumpang pada sepeda motor Honda Beat 2009 [1]. Parameter *swing arm* dan diameter *gear* disajikan pada Tabel 1. Kemudian untuk ilustrasi roda gigi sistem RSA terdapat pada Gambar 1.

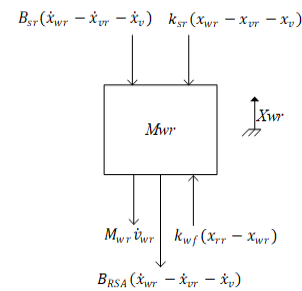
Parameter yang berkaitan dengan kendaraan diambil dari hasil pengukuran kendaraan *scooter* VOLTA. Karena



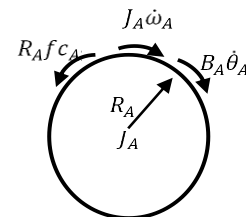
Gambar 4. Free body diagram model 1/2 massa kendaraan.



Gambar 5. Free body diagram massa roda depan kendaraan.



Gambar 6. Free body diagram massa roda depan belakang dengan RSA.



Gambar 7. Free body diagram massa roda depan belakang dengan RSA.

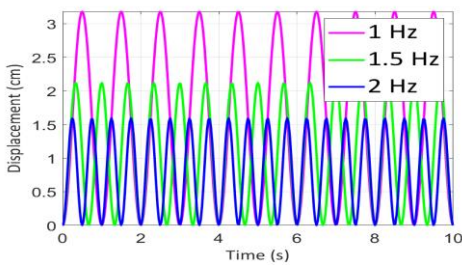
dimensi dan ruang yang tersedia pada *scooter* VOLTA sangat sedikit, maka dilakukan penyesuaian dimensi dengan ukuran dari bahan-bahan yang tersedia di pasar. Parameter yang digunakan disajikan pada Tabel 2.

Parameter-parameter berkaitan dengan generator diambil langsung dari spesifikasi BLDC motor dari pabrikan. Parameter berkaitan dengan *bearing friction* diambil dari penelitian Budiarto 2012 [4]. Parameter berkaitan dengan efisiensi *gear* diambil berdasarkan parameter teknis dari pabrikan dan telah mencakup ketidakpresisian pemasangan *gear*. Sedangkan inersia *gear* diambil dari pemodelan 3D pada *software* solidwork untuk mengetahui nilai dari masing-masing inersia *gear*.

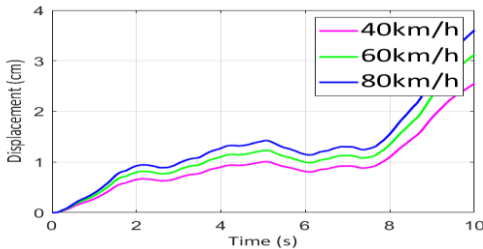
B. Pembuatan Pemodelan Dinamis

Dikarenakan keterbatasan waktu dan geometri, dibuat alat uji RSA dengan parameter yang disesuaikan. Input gerakan suspensi berasal dari putaran *swing arm*. Gerakan naik turun pada roda suspensi akan diubah menjadi gerak rotasi pada *swing arm*. Mekanisme RSA pada skuter elektrik dapat dilihat pada Gambar 2.

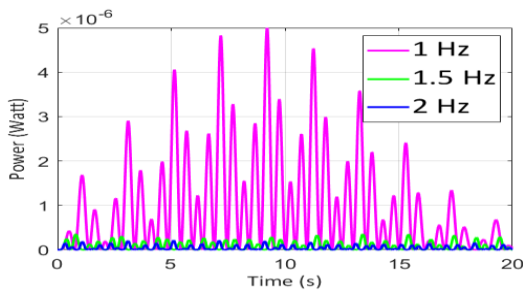
Kemudian gerak rotasi pada *swing arm* akan menghasilkan gerakan rotasi dua arah melalui mekanisme *spur gear* yang



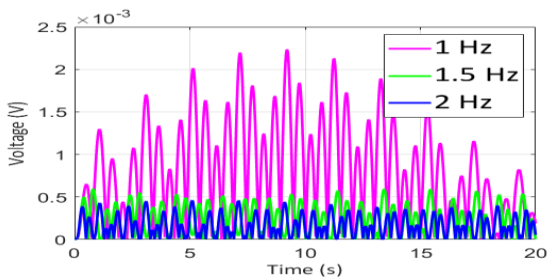
Gambar 8. Input eksitasi sinusoidal.



Gambar 9. Input eksitasi jalan kelas A.



Gambar 10. Grafik energi bangkitan, dengan hambatan 1 ohm eksitasi sinusoidal pada frekuensi 1 Hz, 1,5 Hz dan 2 Hz.

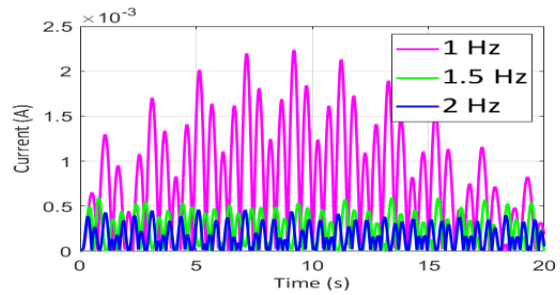


Gambar 11. Grafik tegangan dengan hambatan 1 ohm eksitasi sinusoidal pada frekuensi 1 Hz, 1,5 Hz dan 2 Hz.

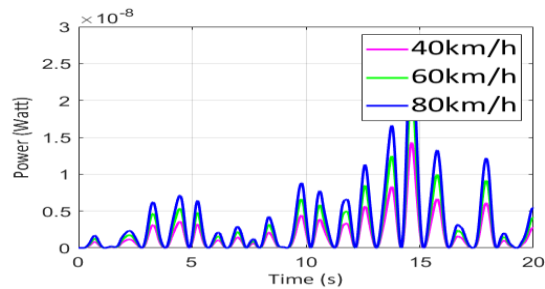
terletak pada *swing arm*. Gerak rotasi 2 arah CW dan CCW akan diubah menjadi satu arah CCW melalui mekanisme *one-way bearing* pada rangkaian *spur gear* yang kemudian disalurkan menuju generator. Pemodelan free body diagram untuk sistem RSA dapat dilihat pada gambar 3.

Pada *free body diagram* di Gambar 3, mewakili sistem keseluruhan dari RSA. Dari *free badan* diagram tersebut kemudian dibagi menjadi dua persamaan gerak yaitu persamaan gerak dari massa kendaraan dan persamaan gerak dari sistem RSA yang meliputi *swing arm*, roda dan transmisi roda gigi. Pada pemodelan ini juga terdapat momen putar dari bagian depan dan belakang kendaraan.

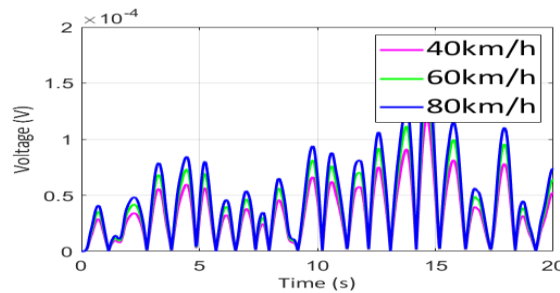
Pemodelan sistem dinamis massa pada kendaraan sepeda motor melibatkan hal yang langsung berhubungan dengan massa kendaraan yaitu sistem suspensi *standar* dari kendaraan yang tetap dipertahankan dalam sistem serta gaya redam dari RSA. Penggambaran *free body diagram* model 1/2 massa kendaraan dapat dilihat pada Gambar 4.



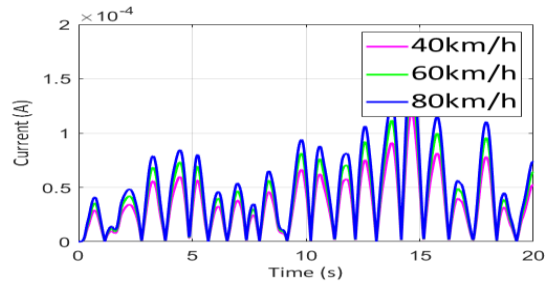
Gambar 12. Grafik kuat arus dengan hambatan 1 ohm eksitasi sinusoidal pada frekuensi 1 Hz, 1,5 Hz dan 2 Hz.



Gambar 13. Grafik energi bangkitan dengan hambatan 1 ohm eksitasi jalan kelas A pada kecepatan 40km/h, 60km/h dan 80km/h.



Gambar 14. Grafik tegangan dengan hambatan 1 ohm eksitasi jalan kelas A pada kecepatan 40km/h, 60km/h dan 80km/h.



Gambar 15. Grafik kuat arus dengan hambatan 1 ohm eksitasi jalan kelas A pada kecepatan 40km/h, 60km/h dan 80km/h.

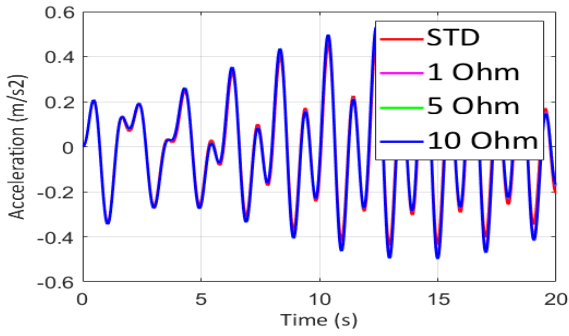
Dari *free badan* diagram Gambar 4, maka didapat persamaan dinamis sebagai berikut:

$$M_v \ddot{v}_v - k_{sf}(x_{wf} - x_{vf} - x_v) - B_{sf}(\dot{x}_{wf} - \dot{x}_{vf} - \dot{x}_v) - k_{sr}(x_{wr} - x_{vr} - x_v) - B_{sr}(\dot{x}_{wr} - \dot{x}_{vr} - \dot{x}_v) = 0 \quad (1)$$

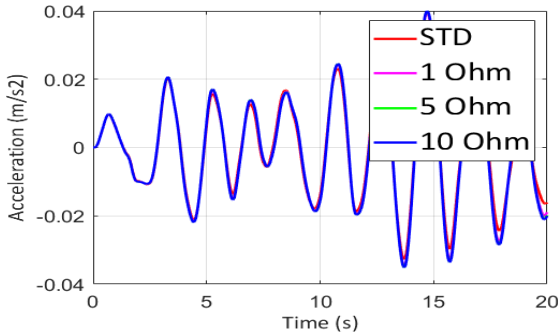
Kemudian pemodelan ditinjau dari masing masing roda baik roda depan maupun belakang. Pemodelan yang ditinjau dari roda meliputi sistem suspensi kendaraan serta konstanta kekakuan dari ban. Koefisien redam dari ban diabaikan.

Persamaan massa roda kendaraan depan pada Gambar 5 adalah sebagai berikut:

$$-M_{wf} \ddot{v}_{wf} + k_{wf}(x_{rf} - x_{wf}) - k_{sf}(x_{wf} - x_{vf} - x_v) - B_{sf}(\dot{x}_{wf} - \dot{x}_{vf} - \dot{x}_v) = 0 \quad (2)$$



Gambar 16. Contoh grafik perbandingan percepatan suspensi standar dan RSA pada eksitasi sinusoidal frekuensi 1 Hz.



Gambar 17. Contoh grafik perbandingan percepatan suspensi standar dan RSA pada eksitasi jalan kelas A kecepatan 40 km/h.

Persamaan massa roda kendaraan belakang pada Gambar 6 adalah sebagai berikut:

$$-M_{wr}\ddot{x}_{wr} + k_{wr}(x_{rr} - x_{wr}) - k_{sr}(x_{wr} - x_{vr} - x_v) - B_{sr}(\dot{x}_{wr} - \dot{x}_{vr} - \dot{x}_v) - B_{RSA}(\dot{x}_{wr} - \dot{x}_{vr} - \dot{x}_v) = 0 \quad (3)$$

Berikut adalah contoh *free body diagram* untuk sistem RSA. Contoh disini adalah *Free body diagram* untuk Gear A. Pada gear 3, jika *swing arm* bergerak secara *counter clockwise*, maka gear 3 bergerak secara *free* dan *bearing friction* diabaikan.

Dari *free body diagram* pada Gambar 7 tersebut didapatkan persamaan gerak sebagai berikut:

$$J_A\dot{\omega}_A + B_A\dot{\theta}_A - R_A F_{c_{A1}} = 0 \quad (4)$$

Dicari persamaan pada tiap-tiap roda gigi. Kemudian digabungkan persamaannya. Dengan menggabungkan semua persamaan dalam sistem ini maka didapat torsi untuk memutar sistem RSA dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_B = (J_A + N^2[J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 + J_6 + J_G])\dot{\omega} + (B_A + N^2[B_1 + B_2 + B_4 + B_5 + B_6 + T_E])\dot{\theta} \quad (5)$$

Digunakan persamaan listrik sebagai gaya redam listrik sebagai berikut [7]:

$$T_E = \frac{1.5}{\eta_{sg}} \frac{k_t k_e}{R_{in} + R_{ex}} \dot{\theta}_g \quad (6)$$

Dengan menggabungkan persamaan (5) dengan persamaan (6) sebagai torsi redam listrik, maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$T_B = (J_A + N^2[J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 + J_6 + J_G])\dot{\omega} + \left(B_A + N^2 \left[B_1 + B_2 + B_4 + B_5 + B_6 + \frac{1.5}{\eta_{sg}} \frac{k_t k_e}{R_{in} + R_{ex}} \right] \right) \dot{\theta} \quad (7)$$

Tabel 1.

Parameter <i>swing arm</i> dan diameter <i>gear</i>	
Parameter	Nilai
Panjang <i>Swing arm</i>	330mm
Diameter <i>Gear A</i>	120mm
Diameter <i>Gear 1,2,3,4,5,6</i>	30mm

Untuk hubungan antara perpindahan angular (θ) satuan radian dengan perpindahan linear (x) satuan meter adalah sebagai berikut:

$$\theta = \frac{x}{l_{swing\ arm}} \quad \dot{\theta} = \frac{\dot{x}}{l_{swing\ arm}} \quad \ddot{\theta} = \frac{\ddot{x}}{l_{swing\ arm}} \quad (8)$$

Dari persamaan diatas maka didapatkan persamaan linier sebagai berikut:

$$T_B = \frac{1}{l_{swing\ arm}} \left[(J_A + N^2[J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 + J_6 + J_G])\dot{v} + \left(B_A + N^2 \left[B_1 + B_2 + B_4 + B_5 + B_6 + \frac{1.5}{\eta_{sg}} \frac{k_t k_e}{R_{in} + R_{ex}} \right] \right) \dot{x} \right] \quad (9)$$

C. Simulasi dan Pengambilan Data

Pemodelan simulasi yang dilakukan ada penelitian ini menggunakan *software* Matlab dan Simulink. Untuk memasukan input variasi jalan, digunakan dua variasi. Variasi pertama merupakan *input* sinusoidal dengan amplitudo sebesar 10cm dan variasi frekuensi sebesar 1Hz, 1,5Hz dan 2Hz. Kemudian variasi tambahan adalah variasi hambatan eksternal yang diberikan kepada generator sebesar 1Ω, 5Ω, dan 10Ω

Variasi inputan kedua adalah profil permukaan jalan *Road Class A* dengan kecepatan 40km/h, 60km/h dan 80km/h dari standar ISO8680 tentang *Road Surface* [3]. Ketika kecepatannya tetap, kecepatan spektrum daya domain waktu adalah sinyal white noise. *Spectral density* konstan adalah sebagai berikut:

$$k = 4\pi^2 n_0^2 G_q(n_0) v \quad (10)$$

Untuk mendapatkan profile permukaan jalan dengan cara mengintegrasikan akar persamaan 3.21 dengan white noise, sehingga didapatkan rumus:

$$q(t) = \sqrt{k} \int_0^t w(t) dt \quad (11)$$

$n_0 = 0,1$ cycle/m $G_q(n_0)$ merupakan nilai rata-rata kelas jalan, dan v merupakan kecepatan kendaraan (m/s) dan $w(t)$ merupakan *white noise*. (Wang & Qiang, 2017) berikut merupakan tabel variasi pembebanan dan parameter yang digunakan dalam simulasi simulink. Digunakan jalan kelas A yang digunakan mengikuti standar ISO 8680 Tentang *road surface* dengan input eksitasi seperti pada Gambar 8. Untuk input eksitasi jalan kelas A dapat dilihat pada Gambar 9.

III. HASIL DAN ANALISIS

Pada simulasi ini didapatkan daya bangkitan dan respon dinamis berupa percepatan vertikal dari RSA.

A. Daya Bangkitan

Pada bangkitan sinusoidal, didapat makin rendah frekuensi maka energi bangkitan makin besar. Didapatkan RMS daya bangkitan terbesar terjadi pada frekuensi 1hz dan hambatan

Tabel 2.
Parameter kendaraan scooter

Parameter	Keterangan	Nilai	Satuan
J_A	Inersia <i>Gear Swing arm</i>	$2,0081 \times 10^{-4}$	Kg.m ²
$J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6$	Inersia <i>Gear Transmisi</i>	$4,3663 \times 10^{-7}$	Kg.m ²
J_G	Inersia Generator	$1,8 \times 10^{-5}$	Kg.m ²
$B_A, B_1, B_2, B_4, B_5, B_6$	<i>Bearing Friction</i>	$2,1 \times 10^{-4}$	N.m.s/rad
N	Rasio gigi	4	-
η	Efisiensi <i>spur gear</i>	0,9	-
k_t	Konstanta torsi generator	0,1	N.m/A
k_g	Konstanta voltase generator	0,1	V.s/rad
R_{in}	Hambatan internal	0,5	ohm
R_{ex}	Hambatan eksternal	6	ohm
M_V	Massa Kendaraan	220	Kg
M_{wf}	Massa roda depan	6,6	Kg
M_{wr}	Massa roda belakang	10	Kg
K_{wf} dan K_{wr}	Koefisien kekakuan roda	1143	N/m
K_{sf}	Koefisien kekakuan pegas depan	27655	N/m
K_{sr}	Koefisien kekakuan pegas belakang	11062	N/m
B_{sf}	Koefisien redaman suspensi depan	36000	N.s/m
B_{sr}	Koefisien redaman suspensi belakang	12000	N.s/m
J_v	Inersia Kendaraan	29	Kg/m ²
$l_{swing arm}$	Jarak poros <i>swing arm</i> dengan roda	0,33	m
w_b	Jarak sumbu roda depan ke belakang	1,21	m
l_f	Jarak Roda Depan ke Titik Pusat Massa	0,7318	m
l_r	Jarak Roda Belakang ke Titik Pusat Massa	0,4782	m

1ohm yaitu pada P: $3,57 \times 10^{-8}$ watt, V: $1,89 \times 10^{-4}$ Volt dan I: $1,89 \times 10^{-4}$ Ampere. Kemudian untuk daya, tegangan dan kuat arus maksimal juga terdapat pada frekuensi 1hz dengan Hambatan 1ohm yaitu P: $4,96 \times 10^{-6}$ Watt. V: 0,00224 Volt dan I: 0,00224 Ampere. Gambar 10 merupakan grafik energi bangkitan dengan hambatan 1 ohm eksitasi sinusoidal pada frekuensi 1 Hz dan 2 Hz. Sedangkan gambar 11 merupakan grafik tegangan dengan hambatan 1 ohm eksitasi sinusoidal pada frekuensi 1 Hz, 1,2 Hz dan 2 Hz. Dan gambar 12 adalah grafik kuat arus dengan hambatan 1 ohm eksitasi sinusoidal pada frekuensi 1 Hz, 1,5 Hz, dan 2 Hz.

Dari gambar grafik pada gambar 10, gambar 11, dan gambar 12, dapat dilihat pada diberi input sinusoidal, grafik yang didapat relatif menghasilkan lonjakan terpola, atau dapat dikatakan menghasilkan tegangan dan daya bangkitan yang relatif konstan pada waktu yang sedikit lama. Perbedaan terjadi pada eksitasi dengan frekuensi 1hz dari setiap variasi hambatan yang mendapatkan energi bangkitan, tegangan dan kuat arus meningkat. Hal tersebut terjadi karena pada frekuensi yang lebih rendah, terjadi gerak relatif yang cukup besar antara bodi kendaraan dan roda sehingga pergerakan swing arm lebih besar. Gambar 10, gambar 11, dan gambar 12 merupakan gabungan tegangan pada seluruh variasi frekuensi dan daya bangkitan pada seluruh variasi frekuensi. Dapat dilihat semakin rendah frekuensi dari eksitasi maka daya yang dibangkitkan juga semakin kecil. RMS daya bangkitan eksitasi sinusoidal dapat dilihat pada Tabel 3, sedangkan RMS tegangan dengan eksitasi sinusoidal terdapat pada Tabel 4, dan RMS kuat arus dengan eksitasi sinusoidal disajikan pada Tabel 5.

Yang kedua adalah daya bangkitan, tegangan dan kuat arus yang dihasilkan oleh eksitasi random Jalan Kelas A. Berbeda dengan bangkitan sinusoidal, Pada eksitasi jalan kelas A didapat makin tinggi kecepatan maka energi bangkitan makin besar. Didapatkan RMS daya bangkitan terbesar terjadi pada

kecepatan 80km/h dan hambatan 1ohm yaitu pada P: $5,43 \times 10^{-9}$ watt, V: $7,37 \times 10^{-5}$ Volt dan I: $7,37 \times 10^{-5}$ Ampere. Kemudian untuk daya, tegangan dan kuat arus Maximal juga terdapat pada kecepatan 80 km/h dengan hambatan 1ohm yaitu P: $2,86 \times 10^{-8}$ Watt. V: $1,69 \times 10^{-4}$ Volt dan I: $1,69 \times 10^{-4}$ Ampere. Gambar 13 merupakan grafik energi bangkitan dengan hambatan 1 ohm eksitasi jalan kelas A pada kecepatan 40 km/h dan 80 km/h. Untuk gambar 14 merupakan grafik tegangan dengan hambatan 1 ohm eksitasi jalan kelas A pada kecepatan 40 km/h, 60 km/h, dan 80 km/h. Sedangkan gambar 15 adalah grafik kuat arus dengan hambatan 1 ohm eksitasi jalan kelas A pada kecepatan 40 km/h, 60 km/h, dan 80 km/h.

Dari gambar grafik pada gambar 14, gambar 15, dan gambar 16, dapat dilihat pada diberi input eksitasi jalan kelas A, grafik yang didapat relatif kurang menghasilkan lonjakan terpola terlihat pada detik ke 8 hingga 20 memiliki lonjakan daya yang berbeda dengan pada detik 2 hingga 4, atau dapat dikatakan menghasilkan tegangan dan daya bangkitan yang kurang relatif konstan. RMS daya bangkitan dengan eksitasi jalan kelas A dapat dilihat pada Tabel 6, sedangkan pada tabel 7 disajikan RMS tegangan dengan eksitasi jalan kelas A, dan untuk Tabel 8 merupakan RMS kuat arus dengan eksitasi jalan kelas A.

Hal ini cukup berbeda dari input eksitasi sebelumnya yaitu sinusoidal, dimana pada eksitasi tersebut, terjadi lonjakan yang konstan.

B. Percepatan Vertikal

Simulasi percepatan vertikal dilakukan untuk mengetahui percepatan vertikal yang dihasilkan saat memperoleh eksitasi. Eksitasi yang digunakan adalah sinusoidal dan eksitasi secara random dengan variasi frekuensi dan hambatan. Simulasi percepatan vertikal bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari kenyamanan berkendara dengan sistem yang diaplikasikan sistem RSA

Tabel 3.

RMS daya bangkitan dengan eksitasi sinusoidal			
Frekuensi Getaran	RMS Daya Bangkitan (W)		
	1 ohm	5 ohm	10 ohm
1 Hz	$3,57 \times 10^{-8}$	$1,31 \times 10^{-9}$	$2,10 \times 10^{-10}$
1,5 Hz	$5,56 \times 10^{-9}$	$1,89 \times 10^{-10}$	$2,95 \times 10^{-11}$
2Hz	$2,99 \times 10^{-9}$	$1,04 \times 10^{-10}$	$1,66 \times 10^{-11}$

Tabel 4.

RMS tegangan dengan eksitasi sinusoidal			
Frekuensi Getaran	RMS Tegangan (V)		
	1 ohm	5 ohm	10 ohm
1 Hz	$1,89 \times 10^{-4}$	$8,09 \times 10^{-5}$	$4,59 \times 10^{-5}$
1,5 Hz	$7,46 \times 10^{-5}$	$3,07 \times 10^{-5}$	$1,72 \times 10^{-5}$
2Hz	$5,47 \times 10^{-5}$	$2,28 \times 10^{-5}$	$1,29 \times 10^{-5}$

Tabel 5.

RMS kuat arus dengan eksitasi sinusoidal			
Frekuensi	RMS Kuat Arus (A)		
	1 ohm	5 ohm	10 ohm
1 Hz	$1,89 \times 10^{-4}$	$1,61802 \times 10^{-5}$	$4,59 \times 10^{-6}$
1,5 Hz	$7,457 \times 10^{-5}$	$6,14492 \times 10^{-6}$	$1,72 \times 10^{-6}$
2Hz	$5,466 \times 10^{-5}$	$4,56289 \times 10^{-6}$	$1,29 \times 10^{-6}$

Tabel 6.

RMS Daya Bangkitan dengan Eksitasi Jalan Kelas A			
Kecepatan	RMS Daya Bangkitan (W)		
	1 ohm	5 ohm	10 ohm
40 km/h	$2,72 \times 10^{-9}$	$1,10 \times 10^{-10}$	$1,82 \times 10^{-11}$
60 km/h	$4,08 \times 10^{-9}$	$1,65 \times 10^{-10}$	$2,73 \times 10^{-11}$
80 km/h	$5,43 \times 10^{-9}$	$2,20 \times 10^{-10}$	$3,64 \times 10^{-11}$

Gambar 16 merupakan data perbandingan percepatan vertikal antara sistem dengan RSA dan sistem standar kendaraan ketika diberi eksitasi sinusoidal dengan variasi kecepatan 1hz, 1,5hz dan 2hz dan juga variasi hambatan 1 ohm, 5 ohm, dan 10 ohm.

Pada frekuensi 1hz didapat percepatan vertikal maksimum pada sistem *shock absorber* standar sebesar 0.4031 m/s² dan pada sistem yang dilengkapi RSA sebesar 0,4264 m/s²; 0,4338 m/s²; dan 0,4356 m/s² untuk variasi hambatan 1 ohm, 5 ohm, dan 10 ohm.

Pada frekuensi 1,5hz didapat percepatan vertikal maksimum pada sistem *shock absorber* standar sebesar 0,1831 m/s² dan pada sistem yang dilengkapi RSA sebesar 0,1929m/s²; 0,196m/s²; dan 0,1968 m/s² untuk variasi hambatan 1 ohm, 5 ohm, dan 10 ohm.

Selanjutnya pada frekuensi 2hz didapat percepatan vertikal maksimum pada sistem *shock absorber* standar sebesar 0.1297 m/s² dan pada sistem yang dilengkapi RSA sebesar 0,1383 m/s²; 0,1408 m/s²; dan 0,1414 m/s² untuk variasi hambatan 1 ohm, 5 ohm, dan 10 ohm.

Dari data pada Tabel 9, besarnya percepatan vertikal maksimum yang didapatkan sistem standar kendaraan lebih besar daripada sistem yang dilengkapi dengan RSA. Hal ini dapat terjadi karena sistem RSA menambahkan daya redam dari sistem yang sudah ada. Terlihat bahwa nilai respon percepatan akan menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi. Dikarenakan makin tinggi frekuensi membuat badan kendaraan pada kondisi yang settle. Berikut adalah data RMS dari masing-masing variasi.

Kemudian data simulasi pada input eksitasi jalan kelas A. Tabel 10 merupakan data perbandingan percepatan vertikal ketika melalui jalan kelas A dengan variasi kecepatan 40 km/h, 60 km/h dan 80 km/h dan juga variasi hambatan 1ohm, 5 ohm, dan 10 ohm. Gambar 17 merupakan contoh grafik

Tabel 7.

RMS tegangan dengan eksitasi jalan kelas A			
Kecepatan	RMS Tegangan (V)		
	1 ohm	5 ohm	10 ohm
40 km/h	$5,21 \times 10^{-5}$	$2,34 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-5}$
60 km/h	$6,38 \times 10^{-5}$	$2,87 \times 10^{-5}$	$1,65 \times 10^{-5}$
80 km/h	$7,37 \times 10^{-5}$	$3,31 \times 10^{-5}$	$1,91 \times 10^{-5}$

Tabel 8.

RMS kuat arus dengan eksitasi jalan kelas A			
Kecepatan	RMS Kuat Arus (A)		
	1 ohm	5 ohm	10 ohm
40 km/h	$5,21 \times 10^{-5}$	$4,68 \times 10^{-6}$	$1,35 \times 10^{-6}$
60 km/h	$6,38 \times 10^{-5}$	$5,74 \times 10^{-6}$	$1,65 \times 10^{-6}$
80 km/h	$7,37 \times 10^{-5}$	$6,63 \times 10^{-6}$	$1,91 \times 10^{-6}$

Tabel 9.

RMS percepatan vertikal dengan eksitasi sinusoidal				
Frekuensi Getaran	RMS Percepatan Vertikal (mm/s ²)			
	1 ohm	5 ohm	10 ohm	STD
1 Hz	0,1573	0,1681	0,1665	0,2054
1,5 Hz	0,04747	0,04291	0,0419	0,06771
2Hz	0,01965	0,01641	0,0157	0,03404

Tabel 10.

RMS percepatan vertikal dengan eksitasi jalan kelas A				
Kecepatan	RMS Percepatan Vertikal (mm/s ²)			
	1 ohm	5 ohm	10 ohm	STD
40 km/h	0,01892	0,0198	0,02001	0,01609
60 km/h	0,02318	0,02425	0,0245	0,01971
80 km/h	0,02676	0,028	0,02829	0,02276

perbandingan percepatan suspensi standar dan RSA pada eksitasi jalan kelas A kecepatan 40 km/h.

Pada kecepatan 40km/h didapat percepatan vertikal maksimum pada sistem *shock absorber* standar sebesar 0.02024 m/s² dan pada sistem yang dilengkapi RSA sebesar 0,02051 m/s²; 0,02061 m/s²; dan 0,02063 m/s² untuk variasi hambatan 1 ohm, 5 ohm, dan 10 ohm.

Pada kecepatan 60km/h didapat percepatan vertikal maksimum pada sistem *shock absorber* standar sebesar 0,02483 m/s² dan pada sistem yang dilengkapi RSA sebesar 0,02515 m/s²; 0,02525 m/s²; dan 0,02527 m/s² untuk variasi hambatan 1 ohm, 5 ohm, dan 10 ohm.

Pada kecepatan 80km/h didapat percepatan vertikal maksimum pada sistem *shock absorber* standar sebesar 0,02867 m/s² dan pada sistem yang dilengkapi RSA sebesar 0,02904 m/s²; 0,02915 m/s²; dan 0,02918 m/s² untuk variasi hambatan 1 ohm, 5 ohm, dan 10 ohm. Berikut adalah data RMS dari masing-masing variasi.

Dari data pada tabel 10 tersebut, besarnya percepatan vertikal maksimum yang didapatkan sistem standar kendaraan lebih kecil daripada sistem yang dilengkapi dengan RSA. Hal ini dapat terjadi karena pengaruh dari eksitasi jalan yang tidak rata dan tidak berulang.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa data yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan: (1) Telah dikembangkan dan dilakukan simulasi pada prototip RSA pada Swing Arm sepeda motor listrik yang dapat menghasilkan energi bangkitan saat terdapat pergerakan dari swing arm pada skuter elektrik. (2) Respon percepatan vertikal yang dihasilkan dengan sistem yang ditambah RSA tidak terlalu beda jauh dengan sistem standar kendaraan. RMS percepatan vertikal terbesar pada system suspensi standar terjadi ketika diberi eksitasi

sinusoidal dengan frekuensi 1hz sebesar 0,2054 m/s² , sedangkan pada sistem yang diberi RSA terjadi ketika diberi eksitasi sinusoidal dengan frekuensi 1hz dan hambatan 1ohm yaitu sebesar 0,1573 m/s² , Untuk RMS percepatan terkecil terjadi ketika diberi eksitasi jalan kelas A dengan kecepatan 40km/h yaitu sebesar 0,01609 m/s² untuk sistem suspensi standar dan untuk sistem yang dilengkapi RSA sebesar 0,0157 m/s² pada eksitasi sinusoidal dengan frekuensi 2hz dengan hambatan 1 ohm. Dengan aplikasi RSA untuk swing arm ini mempengaruhi kenyamanan berkendara terlihat dari percepatan vertikal yang dihasilkan. Pada input sinusoidal dengan frekuensi 1hz, makin tinggi frekuensi dihasilkan percepatan vertikal yang makin rendah. Sedangkan pada input lainnya, makin tinggi kecepatan kendaraan, percepatan vertikal makin tinggi. Hal ini disebabkan oleh pengaruh gerakan pitching atau gerakan rotasi dari badan kendaraan. (3) RMS percepatan vertikal terbesar pada *conventional*.

V. SARAN

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut: (1) Perlu dilakukan perancangan ulang pada sistem *energy harvesting* dari energi getaran pada skuter. Perancangan harus mempertimbangkan putaran generator harus mencukupi untuk energi bangkitan yang dibutuhkan oleh skuter elektrik. (2) Pemodelan dinamis dari sistem kendaraan mempengaruhi keakuratan dari simulasi. Pemodelan dinamis harus dibuat seakurat mungkin dengan kondisi di lapangan. (3) Menghitung secara akurat dimensi

dari setiap komponen yang digunakan untuk sistem RSA. (4) Pemilihan generator sebagai pembangkit daya dapat diperhitungkan ulang. (5) Mematangkan perencanaan untuk tahap perakitan sehingga dalam menyusun setiap komponen dapat terukur kekuatan dan ketahanan agar alat berfungsi dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hakim, A. Y. U. A. "Pemodelan dan Analisis Pengaruh Perubahan Parameter Variable Orifice Sistem Suspensi Hidrolik Terhadap Gaya Redam yang Dihasilkan dan Respon Dinamis Penumpang pada Sepeda Motor Honda Beat 2009," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [2] Ismiyati, Marlita, D., & Saidah, D. "Pencemaran udara akibat emisi gas buang kendaraan bermotor," *Jurnal Manajemen Transportasi & Logistik*, vol. 1, no. 3, pp. 241–248, 2014. doi: 10.25292/j.mtl.v1i3.23
- [3] Wang, J., Qiang, B. "Road Simulation for Four-wheel Vehicle Whole Input Power Spectral Density," Xi'an High Technology Institution, 2017.
- [4] Budiarto, T. "Pemodelan dan Analisa Regenerative Shock Absorber (RSA) pada Sistem Suspensi Kendaraan Militer Roda Ban," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2012.
- [5] Tang, X., Lin, T., & Zuo, "Design and optimization of a tubular linier electromagnetic vibration energy harvester," *IEEE/ASME Transaction of Mechatronics*, vol. 19, no. 2, pp. 615-622, 2014. doi: 10.1109/TMECH.2013.2249666
- [6] Li, Z., Zuo, L., Luhrs, G., Lin, L., & Qin, Y.-x. "Electromagnetic energy harvesting shock absorbers: Design, modeling, and road tests," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 3, pp. 1065-1074, 2013. doi: 10.1109/TVT.2012.2229308
- [7] Maravandi, A., & Moallem, M. "Regenerative shock absorber using a two-leg motion conversion mechanism," *IEEE/ASME Transactions on Mechantronics*, vol. 20, no. 6, pp. 2853-2861, 2015. doi: 10.1109/TMECH.2015.2395437