

**Pemodelan Dan Analisa Energi Yang Dihasilkan
Mekanisme *Multilayer Piezoelectric Vibration Energy Harvesting*
Akibat Pengaruh Variasi Susunannya
Dengan Sistem Suspensi Pada Kendaraan**

Wiwiek Hendrowati⁽¹⁾, Yulia Y. Latumeten⁽²⁾,
Harus Laksana Guntur⁽³⁾, J. Lubi⁽³⁾, I Nyoman Sutantra⁽³⁾

¹Mahasiswa Program Doktor Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITS
E-mail: wiwiek@me.its.ac.id

²Alumni Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITS

³Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITS

Jl. Arif Rahman Hakim, Kampus ITS Keputih, Sukolilo-Surabaya (60111)

Phone: +62-31-5946230, FAX: +62-31-5922941

Abstrak

Pemanfaatan energi getaran pada suspensi dan kemudian dikonversi menjadi energi listrik sedang banyak diteliti. Salah satu metode yang digunakan untuk merubah energi getaran menjadi energi listrik adalah penggunaan *piezoelectric material*. Mekanisme *multilayer piezoelectric vibration energy harvesting (ML PZT VEH)* merupakan mekanisme yang menggunakan metode *piezoelectric* dengan teknologi *multi-layer*. Mekanisme *ML PZT VEH* yang digunakan dipasang pada sistem suspensi tipe *semi trailing*. Susunan pemasangan mekanisme *ML PZT VEH* dengan sistem suspensi akan mempengaruhi respon getaran kendaraan dan energi yang dihasilkan. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan dan analisa akibat pengaruh cara pemasangan mekanisme *ML PZT VEH* pada sistem suspensi kendaraan yang disusun secara seri dengan pegas suspensi dan yang disusun secara paralel dengan sistem suspensi. Kajian pada penelitian ini dilakukan terhadap respon perpindahan, kecepatan dan percepatan kendaraan dalam domain waktu dan frekuensi dengan memberikan eksitasi perpindahan harmonik dan impulsif. Selain itu, analisa juga dilakukan pada hasil energi yang dapat dibangkitkan dari kedua variasi susunan tersebut. Hasil yang didapat adalah pemasangan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi, lebih menguntungkan karena respon getaran tidak berbeda dengan tanpa pemasangan mekanisme *ML PZT VEH*, sehingga performa kendaraan tidak berubah. Energi yang dihasilkan oleh mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi, lebih besar dibandingkan energi yang dihasilkan oleh mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara paralel dengan sistem suspensi, yaitu sebesar 0,035 volt dan $1,8 \times 10^{-4}$ watt.

Keywords: Mekanisme *ML PZT VEH*, *multilayer*, *piezoelectric*, *vibration energy harvesting*, respon getaran kendaraan

1. Pendahuluan

Dalam perkembangan dunia teknologi otomotif, mobil merupakan alat transportasi yang dari ribuan komponen. Salah satu komponen yang sangat penting adalah sistem suspensi. Sistem suspensi ini merupakan kumpulan komponen yang berfungsi meredam getaran yang terjadi pada kendaraan akibat permukaan jalan yang tidak rata sehingga dapat mengurangi kenyamanan berkendara.

Sejalan dengan kemajuan teknologi, sistem suspensi juga mengalami perkembangan. Kalau sebelumnya digunakan sistem suspensi pasif (yang terdiri dari komponen pasif, yaitu pegas dan peredam), saat ini dikembangkan sistem suspensi

semi-aktif [1], [2]. Pada saat kendaraan melintasi jalan yang bergelombang atau tidak rata, sensor getaran akan mengirimkan informasi ke pengontrol komponen aktif. Selanjutnya pengontrol komponen aktif akan mengatur peredam aktif untuk menyesuaikan sifat redamannya. Dan dengan demikian sistem suspensi semi-aktif dapat menjalankan fungsinya sesuai dengan kondisi jalan yang dilalui oleh kendaraan.

Di satu sisi getaran yang signifikan terjadi pada sistem suspensi. Sementara di sisi yang lain, untuk menjalankan fungsinya sistem suspensi semi-aktif memerlukan energi listrik. Berdasar pada kenyataan tersebut muncul ide untuk memanen energi dari getaran yang terjadi di suspensi, yang diubah menjadi

energi listrik yang diperlukan oleh sistem suspensi semi-aktif. Untuk keperluan tersebut, maka dirancanglah mekanisme *Vibration Energy harvesting (VEH)* yang akan dipasang pada suspensi kendaraan untuk memanen energi getaran. Ada beberapa metode dalam memanen energi yaitu *electromagnetic*, *hydraulic* dan *piezoelectric*.

Sejumlah penelitian dan/atau publikasi telah membahas *energy harvesting* dari sumber energi getaran pada suspensi kendaraan menjadi energi listrik, antara lain adalah penggunaan metode *electromagnetic* pada suspensi mobil, yang diteliti oleh Gupta et. al [3] dan Zuo et. al [4]. Selanjutnya secara komersial, metode *hydraulic* pada suspensi mobil telah diproduksi oleh Levant Power Corporation [5] (diberi nama *Genshock*), dengan memodifikasi desain *shock absorber* yang umum. Sedangkan metode *piezoelectric* telah dirancang oleh Pickelmann [6], dengan menggunakan *piezoelectric* yang ditempatkan pada bagian ujung dari silinder *shock absorber* dan dinamai *regenerative shock absorber*. Arizti [7], secara analitis dan simulatif, meneliti *regenerative shock absorber* tersebut dengan berbagai tipe *piezoelectric stack*.

Penelitian yang dilakukan oleh Wiwiek, dkk [8], telah membahas tentang karakteristik getaran pada sistem suspensi kendaraan, akibat pengaruh kondisi permukaan jalan dan kecepatan kendaraan. Penelitian ini merupakan kajian awal yang akan digunakan untuk menganalisa energi listrik yang dihasilkan mekanisme *multilayer piezoelectric vibration energy harvesting (ML PZT VEH)* pada sistem suspensi kendaraan. Kemudian penelitian dilanjutkan dengan memodelkan mekanisme *ML PZT VEH* dan pengaruh pemasangannya pada respon kendaraan oleh Wiwiek, dkk [9, 10].

Berdasarkan latar belakang sebagaimana dipaparkan diatas, pada penelitian ini dilakukan pemodelan dan analisa akibat pengaruh pemasangan mekanisme *ML PZT VEH* pada sistem suspensi kendaraan yang disusun secara seri dengan pegas suspensi dan yang disusun secara paralel dengan sistem suspensi. Kajian yang dilakukan berkaitan dengan respon getaran kendaraan dan energi yang dihasilkan dengan memberikan eksitasi perpindahan impulsive dan harmonik. Pemasangan dan susunan mekanisme *ML PZT VEH* pada sistem suspensi, diduga akan mempengaruhi performa kendaraan, karena mekanisme tersebut mempunyai karakteristik kekakuan dan redaman sendiri.

Nomenklatur

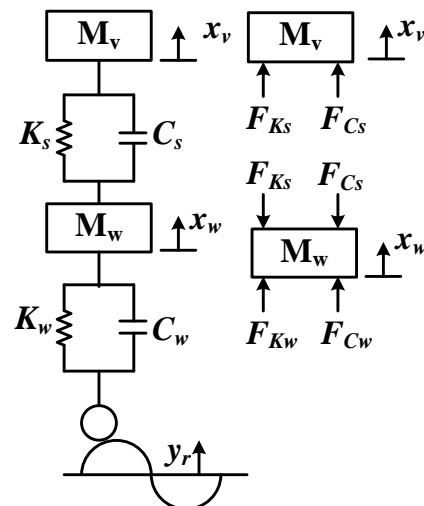
- M_v : massa *sprung* (bodi kendaraan)
- M_w : massa *wheel* (roda)
- K_s : konstanta pegas pada suspensi
- K_w : konstanta pegas pada roda
- C_s : konstanta redaman pada suspensi

- C_w : konstanta redaman pada roda
- C_m : konstanta redaman pada mekanisme *VEH*
- K_m : konstanta redaman pada mekanisme *VEH*
- F_e : Gaya elektrik yang dihasilkan oleh elemen *piezoelectric*
- C : *Capacitance* pada material *piezoelectric*
- R : *Resistance*
- v_a : Voltase yang dihasilkan oleh elemen *piezoelectric*

2. Metodologi

2.1. Sistem Dinamis Kendaraan Tanpa Mekanisme ML PZT VEH

Gambar 1. mengilustrasikan sebuah sistem kendaraan *quarter car* yang terdiri dari dua derajat kebebasan yaitu x_w adalah perpindahan translasi pada ban, x_v adalah perpindahan translasi pada suspensi. Perpindahan eksitasi yang menggambarkan kondisi permukaan jalan yang dilalui kendaraan dinyatakan sebagai y_r .



Gambar 1. Sistem Dinamis Kendaraan *Quarter Car*

Model matematis dari sistem dinamis kendaraan *quarter car* tanpa mekanisme *ML PZT VEH* adalah sebagai berikut:

Massa *Unsprung*

$$\sum F = M_w \ddot{x}_w$$

$$M_w \ddot{x}_w + (C_s + C_w) \dot{x}_w + (K_s + K_w) x_w = C_w \dot{y}_r + K_w y_r + C_s \dot{x}_v + K_s x_v \dots\dots\dots(1)$$

Dari persamaan diatas akan diubah ke Transformasi *Laplace* sebagai berikut :

$$[M_w s^2 + (C_s + C_w) s + (K_s + K_w)] x_w = (C_w s + K_w) y_r + (C_s s + K_s) x_v$$

maka,

$$x_w = G_{k_1}(s) y_r(s) + G_{k_2}(s) x_v(s) \dots\dots\dots(2)$$

$$G_{k_1} = \frac{(C_w s + K_w)}{[M_w s^2 + (C_s + C_w) s + (K_s + K_w)]} \dots\dots\dots(3)$$

$$G_{k2} = \frac{(C_s s + K_s)}{[M_v s^2 + (C_s + C_w)s + (K_s + K_w)]} \dots\dots\dots(4)$$

Massa Sprung

$$\sum F = M_v \ddot{x}_v$$

$$M_v \ddot{x}_v + C_s \dot{x}_v + K_s x_v = C_s \dot{x}_w + K_s x_w \dots\dots\dots(5)$$

Dari persamaan diatas akan diubah ke Transformasi Laplace sebagai berikut :

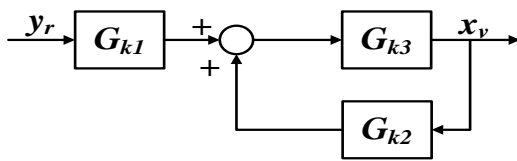
$$[M_v s^2 + C_s s + K_s] x_v = (C_s s + K_s) x_w$$

maka,

$$x_v = G_{k3}(s) x_w(s) \dots\dots\dots(6)$$

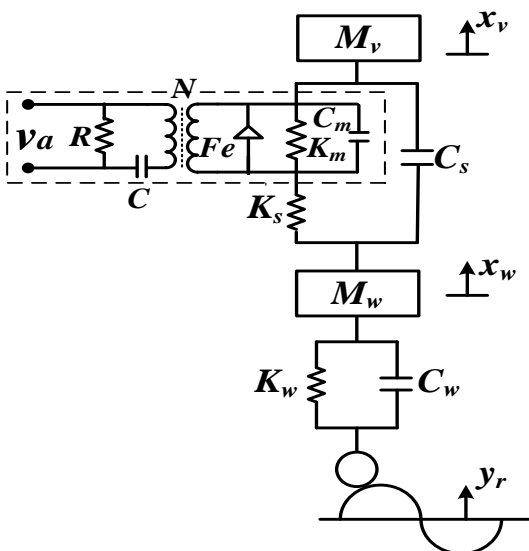
$$G_{k3} = \frac{(C_s s + K_s)}{[M_v s^2 + C_s s + K_s]} \dots\dots\dots(7)$$

Bentuk blok diagram dari persamaan-persamaan diatas adalah sebagai berikut :



Gambar 2. Blok Diagram Transfer Function Kendaraan Tanpa Mekanisme ML PZT VEH

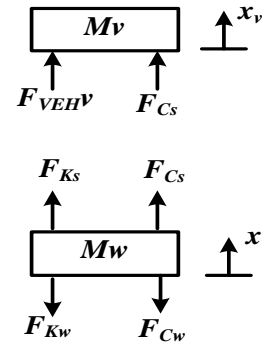
2.2. Penambahan Mekanisme ML PZT VEH Disusun Secara Seri Dengan Pegas Suspensi



Gambar 3. Sistem Dinamis Kendaraan Dengan Mekanisme ML PZT VEH Disusun Secara Seri

Gambar 3. mengilustrasikan sebuah sistem kendaraan *quarter car* dengan penambahan mekanisme ML PZT VEH yang disusun secara seri dengan pegas suspensi. Diagram benda bebas (*free body diagram*) dari sistem kendaraan *quarter car* ditunjukkan pada **Gambar 4.**

Model matematis dari sistem dinamis kendaraan *quarter car* dengan mekanisme ML PZT VEH yang disusun secara seri dengan pegas sistem suspensi kendaraan adalah sebagai berikut:



Gambar 4. Free body Diagram Sistem Kendaraan

Massa Unsprung

$$\sum F = M_w \ddot{x}_w$$

$$M_w \ddot{x}_w + (C_s + C_w) \dot{x}_w + (K_s + K_w) x_w = C_w \dot{y}_r + K_w y_r + C_s \dot{x}_v + K_s x_v \dots\dots\dots(8)$$

Dari persamaan diatas akan diubah ke Transformasi Laplace sebagai berikut :

$$[M_w s^2 + (C_s + C_w)s + (K_s + K_w)] x_w = (C_w s + K_w) y_r + (C_s s + K_s) x_v$$

maka,

$$x_w = G_1(s) y_r(s) + G_2(s) x_v(s) \dots\dots\dots(9)$$

$$G_1 = \frac{(C_w s + K_w)}{[M_w s^2 + (C_s + C_w)s + (K_s + K_w)]} \dots\dots\dots(10)$$

$$G_2 = \frac{(C_s s + K_s)}{[M_w s^2 + (C_s + C_w)s + (K_s + K_w)]} \dots\dots\dots(11)$$

Massa Sprung

$$\sum F = M_v \ddot{x}_v$$

$$F_{v,i} = F_{C_s} + F_{VEH^v}$$

$$M_v \ddot{x}_v + C_s \dot{x}_v = C_s \dot{x}_w + F_{VEH^v} \dots\dots\dots(12)$$

Dari persamaan diatas akan diubah ke Transformasi Laplace sebagai berikut :

$$[M_v s^2 + C_s s] x_v = (C_s s) x_w + F_{VEH^v}$$

maka,

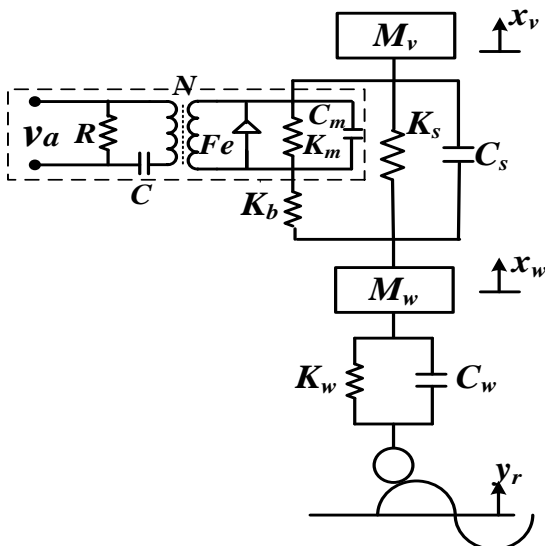
$$x_v = G_3(s) x_w(s) + G_4(s) F_{VEH^v}(s) \dots\dots\dots(13)$$

$$G_3 = \frac{C_s s}{[M_v s^2 + C_s s]} \dots\dots\dots(14)$$

$$G_4 = \frac{1}{[M_v s^2 + C_s s]} \dots\dots\dots(15)$$

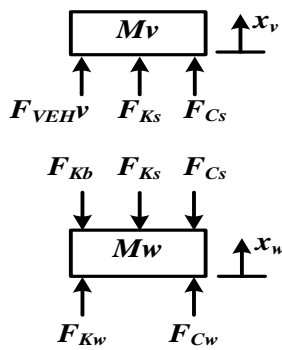
2.3. Penambahan Mekanisme ML PZT VEH Yang Disusun Secara Paralel Dengan Sistem Suspensi

Gambar 5. mengilustrasikan sebuah sistem kendaraan *quarter car* dengan penambahan mekanisme ML PZT VEH yang disusun secara paralel dengan sistem suspensi.



Gambar 5. Sistem Dinamis Kendaraan Dengan Mekanisme ML PZT VEH Disusun Secara Paralel

Diagram benda bebas (*free body diagram*) dari sistem kendaraan *quarter car* adalah sebagai berikut



Gambar 6. Free body diagram sistem kendaraan

Model matematis dari sistem dinamis kendaraan *quarter car* dengan mekanisme ML PZT VEH yang disusun secara paralel adalah sebagai berikut:

Massa Unsprung

$$\sum F = M_w \ddot{x}_w$$

$$M_w \ddot{x}_w + (C_s + C_w) \dot{x}_w + (K_s + K_w + K_b) x_w = C_w \dot{y}_r + K_w y_r + C_s \dot{x}_v + (K_s + K_b) x_v$$

.....(16)

Dari persamaan diatas akan diubah ke Transformasi Laplace sebagai berikut :

$$[M_w s^2 + (C_s + C_w) s + (K_s + K_w + K_b)] x_w = (C_w s + K_w) y_r + [C_s s + (K_s + K_b)] x_v$$

maka,

$$x_w = G_1(s) y_r(s) + G_2(s) x_v(s)$$

.....(17)

$$G_1 = \frac{C_w s + K_w}{[M_w s^2 + (C_s + C_w) s + (K_s + K_w + K_b)]}$$

.....(18)

$$G_2 = \frac{[C_s s + (K_s + K_b)]}{[M_w s^2 + (C_s + C_w) s + (K_s + K_w + K_b)]}$$

.....(19)

Massa Sprung

$$\sum F = M_v \ddot{x}_v$$

$$M_v \ddot{x}_v + C_s \dot{x}_v + K_s x_v = C_s \dot{x}_w + K_s x_w + F_{VEH^v}$$

.....(20)

Dari persamaan diatas akan diubah ke Transformasi Laplace sebagai berikut :

$$[M_v s^2 + C_s s + K_s] x_v = (C_s s + K_s) x_w + F_{VEH^v}$$

maka,

$$x_v = G_3(s) x_w(s) + G_4(s) F_{VEH^v}(s)$$

.....(21)

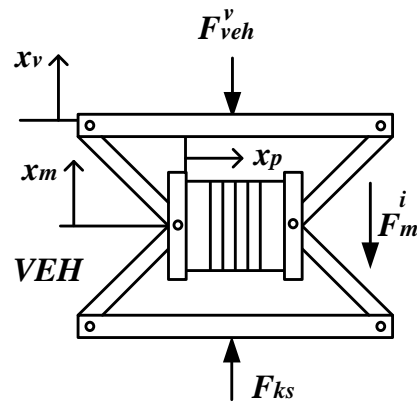
$$G_3 = \frac{C_s s + K_s}{[M_v s^2 + C_s s + K_s]}$$

.....(22)

$$G_4 = \frac{1}{[M_v s^2 + C_s s + K_s]}$$

.....(23)

2.4. Mekanisme ML PZT VEH



Gambar 7. Mekanisme ML PZT VEH

$$F_m^i + F_{VEH^v} = F_{Ks}$$

$$M_m \ddot{x}_m + F_{VEH^v} = K_s (x_w - x_v)$$

$$M_m \ddot{x}_m + K_s x_m = K_s x_w - F_{VEH^v}$$

Karena perubahan x_m sangat kecil maka dianggap sama dengan x_v

$$M_m \ddot{x}_v + K_s x_v = K_s x_w - F_{VEH^v}$$

.....(24)

Dari persamaan diatas akan diubah ke Transformasi Laplace sebagai berikut :

$$F_{VEH^v} = -(M_m s^2 + K_s) x_v + K_s x_w$$

maka,

$$F_{VEH^v} = -G_5(s) x_v(s) + G_6(s) x_w(s)$$

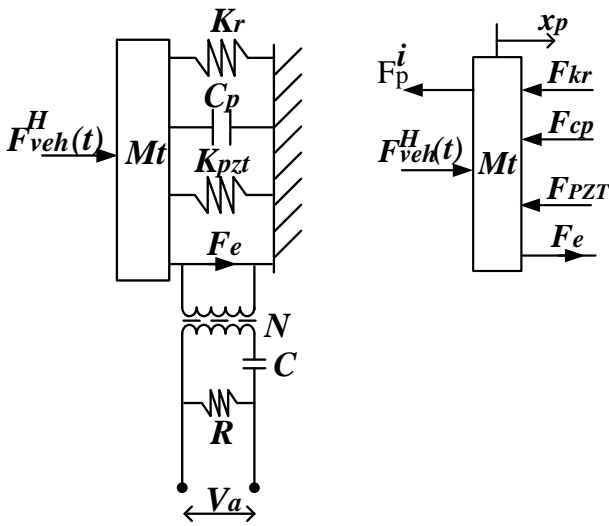
.....(25)

$$G_5 = -(M_m s^2 + K_s)$$

.....(26)

$$G_6 = K_s$$

.....(27)



Gambar 8. Pemodelan Sistem Mekanik-Elektrik

$$F_p^i + F_{C_m} + F_{K_{pzt}} + F_{K_r} = F_{VEH^v} + F_e$$

$$M_t \ddot{x}_p + C_m \dot{x}_p + (K_{pzt} + K_r)x_p = \frac{F_{VEH^v}}{\tan 20} + \left(N \frac{N}{C}\right) x_p$$

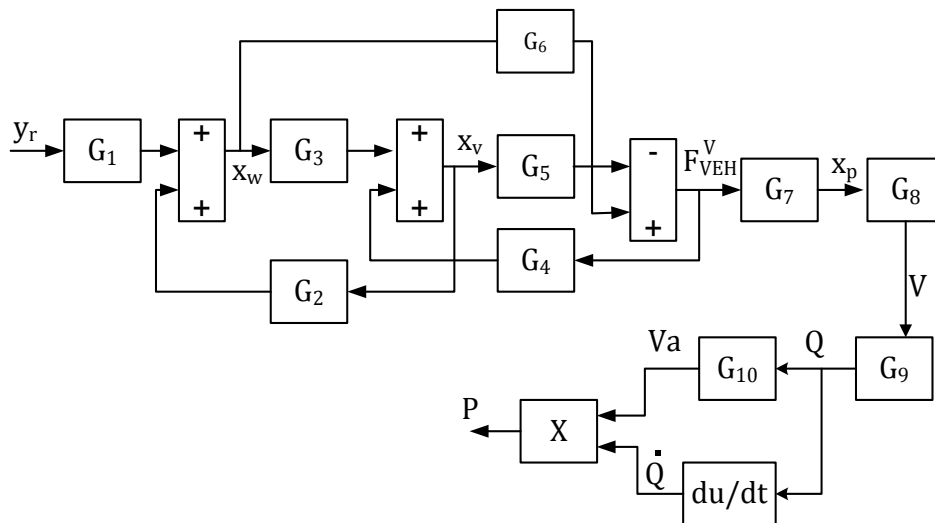
$$M_t \ddot{x}_p + C_m \dot{x}_p + (K_{pzt} + K_r)x_p + \left(N \frac{N}{C}\right) x_p = \frac{F_{VEH^v}}{\tan 20}$$

.....(28)

Dari persamaan diatas akan diubah ke Transformasi Laplace sebagai berikut :

$$\left[M_t s^2 + C_m s + \left((K_{pzt} + K_r) + \left(N \frac{N}{C} \right) \right) \right] x_p = \frac{F_{VEH^v}}{\tan 20}$$

maka,



Gambar 9. Blok Diagram Transfer Function Kendaraan Dengan Mekanisme ML PZT VEH

$$x_p = G_7(s) F_{VEH^v}(s) \tag{29}$$

$$G_7 = \frac{1}{[M_t s^2 + C_m s + ((K_{pzt} + K_r) + (N \frac{N}{C}))] \tan 20} \tag{30}$$

Voltase dan Daya

$$v(s) = (N/C)x_p \tag{31}$$

$$v(s) = G_8 x_p \tag{32}$$

$$G_8 = N/C$$

$$v_a(s) = v(s) - v_c(s)$$

$$R\dot{Q}(s) = v(s) - \frac{Q(s)}{C}$$

$$R\dot{Q}(s) + \frac{Q(s)}{C} = v(s)$$

Jika diubah kedalam bentuk Laplace, maka persamaannya menjadi :

$$\left[R.s + \frac{1}{C} \right] Q(s) = v(s) \tag{33}$$

$$Q(s) = G_9 v(s) \tag{34}$$

$$G_9 = \frac{1}{[R.s + \frac{1}{C}]}$$

$$v_a(s) = R\dot{Q}(s)$$

$$v_a(s) = (R.s)Q(s) \tag{35}$$

$$v_a(s) = G_{10} Q(s) \tag{36}$$

$$G_{10} = R.s$$

$$\dot{Q}(s) = s.Q(s)$$

$$\dot{Q}(s) = G_{11} Q(s) \tag{37}$$

$$G_{11} = s \tag{38}$$

$$P = v_a(s)\dot{Q}(s) \tag{39}$$

Bentuk blok diagram dari persamaan-persamaan diatas adalah sebagai berikut :

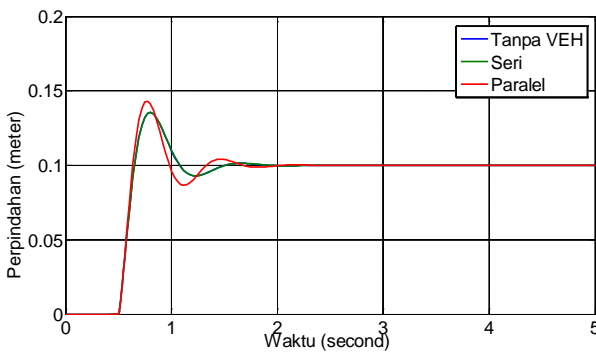
3. Hasil dan Pembahasan

Beberapa nilai parameter yang diketahui adalah sebagai berikut:

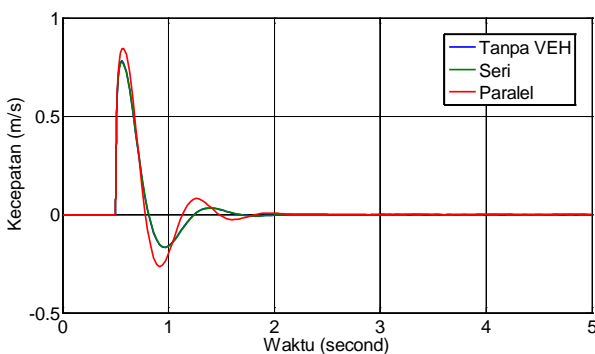
M_{us}	: 45kg	;	M_s	: 280kg
K_s	: 20.000N/m	;	K_w	: 160.000N/m
C_s	: 2500Ns/m	;	C_w	: 4.090Ns/m
Y	: $4,9 \times 10^{10}$ N/m ²	;	A	: 0,0004m ²
M_p	: 0,1kg	;	t	: 0,001m
n	: 15	;	d_{33}	: 472×10^{-12} C/N
C	: 510×10^{-9} F	;	R	: 100ohm
C_m	: 100Ns/m	;		

3.1. Perbandingan Respon Kendaraan

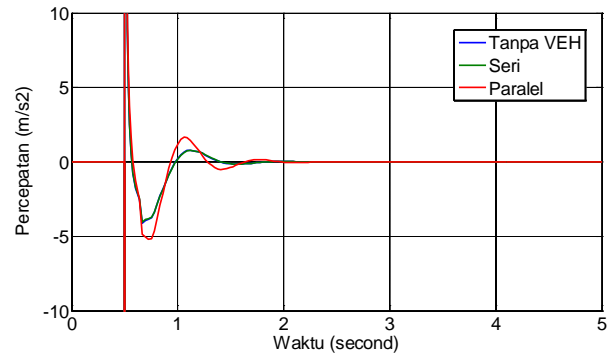
Hasil pada subbab ini merupakan analisa perbandingan respon kendaraan tanpa menggunakan mekanisme *ML PZT VEH*, kendaraan dengan penambahan mekanisme *ML PZT VEH* disusun secara seri dengan pegas suspensi dan yang disusun secara paralel dengan sistem suspensi. Grafik ditampilkan dalam *time domain* dan *frekuensi domain*.



Gambar 10. Perbandingan Respon Perpindahan Kendaraan Massa *Sprung*



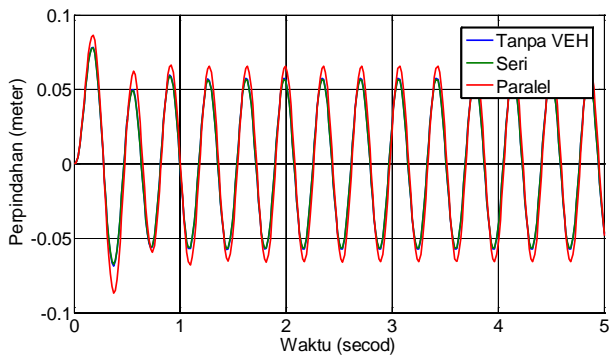
Gambar 11. Perbandingan Respon Kecepatan Kendaraan Massa *Sprung*



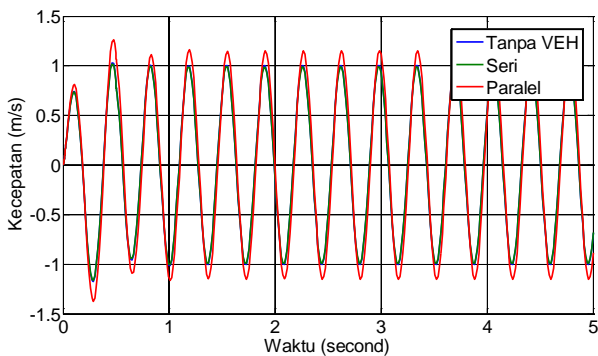
Gambar 12. Perbandingan Respon Percepatan Kendaraan Massa *sprung*

Gambar 10., Gambar 11. dan Gambar 12., menunjukkan grafik *time domain* dari respon kendaraan (massa *sprung*) akibat beban eksitasi step sebesar 0,1m dan 0,5detik. Analisa dilakukan pada respon perpindahan, kecepatan dan percepatan. Dari gambar-gambar tersebut, menunjukkan tidak adanya perbedaan yang signifikan antara respon massa *sprung* pada kendaraan tanpa dan dengan penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi. Sedangkan pada penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara paralel dengan sistem suspensi, massa *sprung* memiliki respon yang lebih tinggi. Namun pada ketiga grafik tersebut mempunyai kecenderungan yang hampir sama yaitu kendaraan akan mengalami kondisi stabil setelah sekitar 1,5detik. Kemudian pada **Gambar 12,** ditunjukkan juga bahwa amplitudo maksimum respon percepatan massa *sprung* masih dalam kondisi aman dan nyaman bagi pengendara.

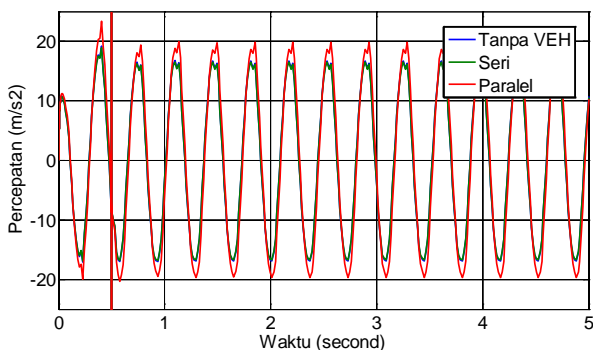
Selanjutnya analisa dilakukan dengan memberikan eksitasi harmonik dengan amplitudo 0,1m dan 17,5rad/s (60km/jam; dengan asumsi panjang gelombang jalan 6m). Pada **Gambar 13., Gambar 14. dan Gambar 15.,** merupakan grafik-grafik respon kendaraan tanpa menggunakan mekanisme *ML PZT VEH*, kendaraan dengan penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi dan yang disusun secara paralel dengan sistem suspensi, untuk perpindahan, kecepatan dan percepatan. Sebagaimana bahasan sebelumnya, dinyatakan bahwa grafik-grafik tersebut menunjukkan tidak adanya perbedaan yang signifikan antara respon massa *sprung* pada kendaraan tanpa dan dengan penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi. Sedangkan pada penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara paralel dengan sistem suspensi, massa *sprung* memiliki respon yang lebih tinggi, baik itu pada respon perpindahan, kecepatan dan percepatan.



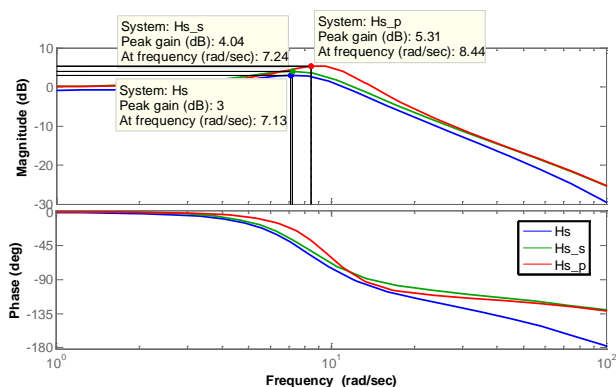
Gambar 13. Perbandingan Respon Perpindahan Massa *sprung* Kendaraan



Gambar 14. Perbandingan Respon Kecepatan Massa *sprung* Kendaraan



Gambar 15. Perbandingan Respon Percepatan Massa *sprung* Kendaraan



Gambar 16. Bode Diagram Perbandingan Respon Kendaraan

Pada **Gambar 16.** merupakan *bode diagram* yang menunjukkan tentang perbesaran respon massa *sprung* dari kendaraan tanpa menggunakan mekanisme *ML PZT VEH* (H_s), kendaraan dengan penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi (H_{s_s}) dan kendaraan dengan penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara paralel dengan sistem suspensi (H_{s_p}). Dari ketiga grafik mempunyai kecenderungan yang sama, semakin bertambah frekuensi (kecepatan) operasional, maka perbesarannya akan meningkat hingga frekuensi natural sistem suspensi. Setelah melewati frekuensi naturalnya, grafik akan menurun. Dengan kondisi masing-masing tinjauan, titik puncak dari grafik-grafik tersebut berbeda-beda. Pada kendaraan tanpa menggunakan mekanisme *ML PZT VEH*, perbesarannya (H_s) terjadi pada frekuensi 7,13rad/sec atau 24,5km/jam, dengan nilai 3dB atau 1,41. Sedangkan pada kendaraan dengan penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi, perbesarannya (H_{s_s}) terjadi pada frekuensi 7,24rad/sec atau 14,57km/jam, dengan nilai 4,04dB atau 1,59. Dan untuk kendaraan dengan penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara paralel dengan sistem suspensi, perbesarannya (H_{s_p}) terjadi pada frekuensi 8,44rad/sec atau 29km/jam, dengan nilai 5,31dB atau 1,84.

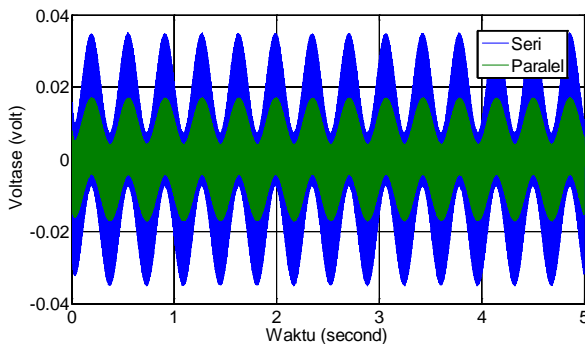
Dari analisa-analisa di atas, dinyatakan bahwa penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi, tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan kendaraan yang tanpa menggunakan mekanisme *ML PZT VEH*. Hal ini dapat dikatakan pula bahwa penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi tidak merubah performa kendaraan.

3.2. Analisa Energi Yang Dihasilkan Mekanisme *ML PZT VEH*

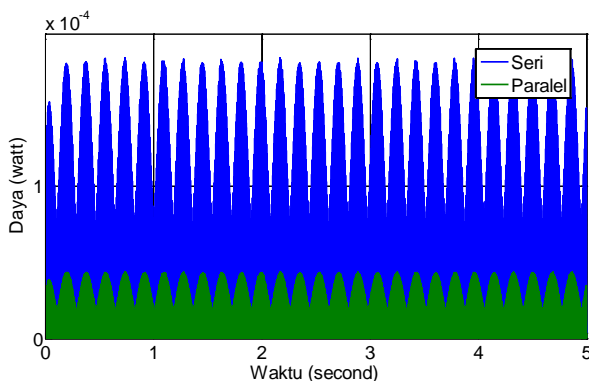
Mekanisme *ML PZT VEH* yang sudah dipasang pada kendaraan akan menghasilkan energi listrik yang dinyatakan dalam voltase dan daya. Dengan memberikan eksitasi perpindahan harmonik sebesar amplitudo 0,1m dan frekuensi 17,5rad/s akan diperoleh voltase dan daya dari mekanisme *ML PZT VEH*. Sesuai dengan permodelan matematis yang telah diperoleh pada subbab sebelumnya, maka pada subbab ini akan dibahas mengenai energi listrik yang dihasilkan. Analisa dilakukan dengan menampilkan grafik dalam bentuk *time domain*.

Pada **Gambar 17.**, menunjukkan besarnya voltase yang dihasilkan mekanisme *ML PZT VEH*, baik yang disusun seri dengan pegas ataupun yang disusun paralel dengan sistem suspensi. Voltase yang dihasilkan oleh mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi

menghasilkan 0,035volt, dimana voltase tersebut lebih tinggi dibandingkan voltase yang dihasilkan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun paralel dengan sistem suspensi yaitu 0,017volt. Sedangkan pada **Gambar 18**, menunjukkan besarnya daya yang dihasilkan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi sebesar $1,8 \times 10^{-4}$ watt, yang mana daya tersebut lebih tinggi jika dibandingkan dengan daya yang dihasilkan mekanisme *ML PZT VEH* yang dipasang paralel yaitu $0,42 \times 10^{-4}$ watt.



Gambar 17. Grafik Voltase Yang Dapat Dihasilkan Mekanisme *ML PZT VEH*



Gambar 18. Grafik Daya Yang Dapat Dihasilkan Mekanisme *ML PZT VEH*

Seperti pada bahasan sebelumnya, bahwa penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi, lebih menguntungkan dibandingkan dengan penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara paralel dengan sistem suspensi. Hal ini ditunjukkan dengan besarnya voltase dan daya yang dihasilkan sebesar 2 kali dan 4,2 kali dari kendaraan dengan penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara paralel dengan sistem suspensi.

4. Kesimpulan

Hasil yang dapat disimpulkan dari penelitian ini adalah

1. Penambahan dan peletakan mekanisme *ML PZT VEH* secara seri dengan pegas, tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan pada

respon getaran kendaraan, sehingga mekanisme *ML PZT VEH* tidak mengganggu kenyamanan kendaraan.

2. Pada kecepatan kendaraan 60km/jam, kendaraan penambahan mekanisme *ML PZT VEH* yang disusun secara seri dengan pegas suspensi akan menghasilkan voltase sebesar 0,035volt dan $1,8 \times 10^{-4}$ watt.

Referensi

- [1] Fischer, D., and R. Isermann, *Mechatronic Semi-Active and Active Vehicle Suspensions*, Control Engineering Practice 12, pp. 1353-1367, 2004
- [2] Fateh, M. M., and S. S. Alavi, *Impedance Control of An Active Suspension Sistem*, Mechatronics 19, pp. 134-140, 2009, www.Elsevier.com/locate/mechatronics
- [3] A. Gupta, J. A. Jendrzejczyk, T. M. Mulcahy and J. R. Hull, *Design of electromagnetic shock absorber*, Int. J. Mech. Mater. Des., In press, 2007, doi: 10.1007/s10999-007-9031-5
- [4] L. Zuo, B. Scully, J. Shestani and Y. Zhou, *Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions*, Smart Mater. Struct., IOP Publishing, Vol. 19, 2010, 045003(10pp), doi:10.1088/0964-1726/19/4/045003, May, 2009
- [5] *Levant Power: Revolutionary Genshock Technology*, Product Catalogue, Levant Power Corporation, www.levanpower.com
- [6] L. Pickelmann, *Low Voltage Co-fired Multilayer Stack, Rings and Chips for Actuation*, Piezomechanik, Munich, 2004, www.piezo-mechanik.com
- [7] M. Arizti, *Harvesting Energy from Vehicle Suspension*, Master of Science Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, Finland, 2010
- [8] W. Hendrowati, J. Lubi, dan Harus L.G., *Studi Karakteristik Getaran Pada sistem Suspensi Pegas Daun Dan Pegas Spiral Akibat Pengaruh Kondisi Permukaan Jalan Dan Kecepatan Yang Bervariasi*, SNTTM X, Malang, 2-3 November 2011.
- [9] W. Hendrowati, Harus L.G. dan I. N. Sutantra, *Pemodelan Dan Analisa Energi Yang Dihasilkan Mekanisme Multilayer Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Akibat Pengaruh Variasi Sudut Mekanisme*, SNTM 7 Petra, Surabaya, 21 Juni 2012
- [10] W. Hendrowati, Harus L.G. dan I. N. Sutantra, *Pemodelan Dan Analisa Respon Getaran Kendaraan Akibat Pemasangan Mekanisme Multilayer Piezoelectric Vibration Energy Harvesting*, SNTM 7 Petra, Surabaya, 21 Juni 2012