

## Model Sederhana Tanggul Pemanen Energi dengan Mekanisme Getaran dan Induksi Elektromagnetik Linier

Meifal Rusli<sup>1,a\*</sup> dan M Taufik Esman<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Kampus Limau Manis Padang 25163-  
Indonesia

Email: [a\\_meifal@ft.unand.ac.id](mailto:a_meifal@ft.unand.ac.id), [b\\_taufikmecheng@gmail.com](mailto:b_taufikmecheng@gmail.com)

### Abstrak

Krisis energi dan peningkatan jumlah kendaraan bermotor di jalan raya telah memunculkan peluang dan tantangan baru sebagai salah satu sumber energi alternatif. Pada makalah ini, sebuah model pembangkit listrik yang mengadopsi bentuk tanggul jalan direkayasa secara mekanik menjadi sebuah sistem pemanen energi kinetik dari tumbukan kendaraan yang melaluinya. Komponen tanggul berupa tanggul berupa batang yang ditutupi dengan pegas, dipasangkan empat buah generator listrik induksi linier dengan posisi tertentu di bagian bawahnya. Eksitasi berupa tumbukan pada tanggul ikut menggetarkan subsistem generator yang terdiri dari massa magnet yang ditutupi pegas serta lilitan kawat konduktor. Pergerakan osilasi massa magnet menghasilkan induksi elektromagnetik sehingga menghasilkan energi listrik. Untuk model tanggul sederhana yang telah dibuat, hasil pemodelan numerik dari model sistem menunjukkan bahwa pembangkit memanen energi maksimal pada frekuensi 16,42 Hz. Pada pengujian, frekuensi generator terekam sebesar 17,5 Hz, 18 Hz, 19 Hz, dan 21 Hz. Tegangan listrik maksimum yang terpanen generator adalah 2,5 Volt dengan daya bangkitan sebesar  $8,9 \times 10^{-3}$  Watt. Sedangkan tegangan total yang terpanen dari keempat generator sebesar 7,92 Volt dan daya bangkitan total sebesar  $2,3 \times 10^{-2}$  Watt.

**Kata kunci** : Pemanen energi, induksi elektromagnetik linier, frekuensi pribadi, eksitasi tumbukan

### Latar belakang

Bertambahnya kepadatan kendaraan bermotor di jalan raya menimbulkan potensi energi kinetik yang besar dikarenakan adanya beban dan laju kendaraan tersebut dalam jumlah yang banyak. Hal ini telah memunculkan peluang dan tantangan untuk mengatasi masalah krisis energi dewasa ini. Peluang datang dari sisi peningkatan volume kendaraan bermotor yaitu sampai 12% pertahun [1]. Tantangannya adalah bagaimana cara memanfaatkan hal ini sebagai sumber energi baru dan juga bersifat terbarukan.

Pemanenan energi (*energy harvesting*) merupakan suatu teknik pengambilan energi yang terbuang dan belum termanfaatkan secara optimal seperti dari panas sisa, cahaya, gelombang, dan energi kinetik dan kemudian dikonversikan ke dalam bentuk energi lain yang bisa dimanfaatkan seperti energi listrik.

Energi kinetik merupakan salah satu sumber energi yang bisa dipanen. Energi kinetik yang dipanen biasanya bersumber dari getaran atau yang lebih dikenal dengan pemanenan energi getaran (*vibration energy harvesting*).

Energi kinetik berbasis getaran memiliki beberapa teknik pemanenan yaitu,

elektromagnetik, elektrostatik, piezoelektrik [2]. Perbandingan kemampuan dari beberapa teknik pemanen energi getaran dapat dilihat pada tabel 1.

**Tabel 1.** Perbandingan beberapa teknik pemanen energi kinetik [3]

Teknik Pemanenan	Densitas Energi	Ukuran Arus
Elektrostatik	$4 \text{ mJ/cm}^3$	Terintegrasi
Elektromagnetik	$24,8 \text{ mJ/cm}^3$	Makro
Piezoelektrik	$35,4 \text{ mJ/cm}^3$	Makro

Berdasarkan densitas energi yang dihasilkan, teknik pemanenan yang menggunakan piezoelektrik lebih efektif dengan menghasilkan jumlah energi paling banyak. Namun mahalnya material piezoelektrik menjadikan metode elektromagnetik menjadi alternatif pilihan karena selain energi yang dihasilkan relatif besar, teknologinya pun relatif lebih murah.

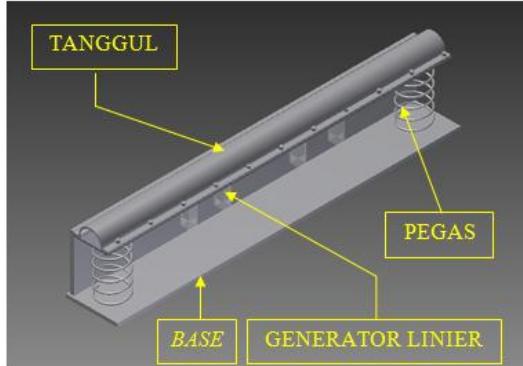
Pemanenan energi kinetik telah dikembangkan para peneliti dalam berbagai aplikasi seperti pemanfaatan tanggul jalan [4,5], getaran mesin kapal [6], dan pergerakan sendi tubuh manusia [7].

Dalam makalah ini akan dibahas sebuah model sederhana pemanfaatan tanggul jalan sebagai

pemanen energi dari kendaraan yang lewat di atasnya. Untuk pengubahan energi kinetik menjadi energi listrik digunakan generator linier membangkitkan energi melalui osilasi getaran yang dieksitas oleh tumbukan pada tangul.

## Model Tangul Pembangkit Energi

Gambaran umum model pembangkit energi dapat diamati pada Gambar 1. Sistem pembangkit terdiri dari tangul berupa batang yang ditumpu oleh dua pegas pada kedua ujungnya, dan generator induksi linier. Tangul dieksitas oleh tumbukan roda kendaraan yang lewat di atasnya.



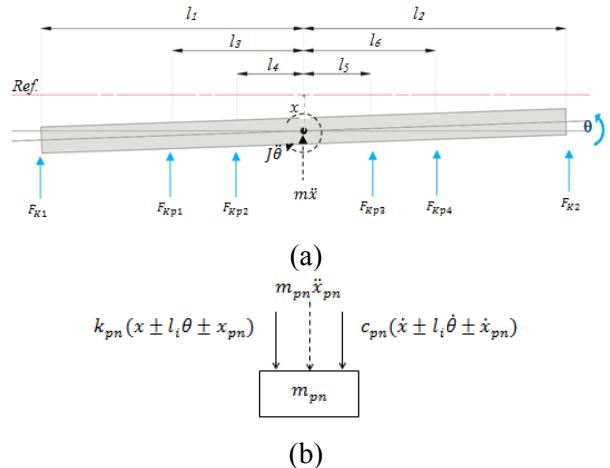
**Gambar 1.** Gambaran umum model sistem tangul pemanen energi

Jumlah generator linier yang digunakan pada model ini adalah empat buah dan terpasang pada jarak tertentu dari pusat massa. Generator linier terdiri dari komponen massa berupa magnet permanen yang ditumpu dengan pegas bergerak relatif terhadap lilitan kawat yang diam.

Komponen tangul diidealisasikan dalam bentuk sebuah batang pejal yang memiliki dimensi panjang dan massa tertentu. Untuk mengetahui respon tangul, maka digunakan metode pendekatan dengan metode koordinat kopel. Dalam referensi [8], metode koordinat kopel terdiri dari sistem terkopel statik, sistem terkopel dinamik, serta sistem terkopel statik-dinamik. Penelitian ini menggunakan metode terkopel statik, dimana pembebanan dilakukan di titik yang diasumsikan sebagai pusat massa dan pusat perputaran massa tangul.

Pemodelan matematis linier generator biasanya dimodelkan dengan sistem massa, pegas, dan peredam yang mengalami eksitasi pada tumpuan (*base excitation*)[9].

Sistem pembangkit dimodelkan dalam bentuk 6 derajat kebebasan yang terdiri dari orientasi translasi dan rotasi tangul serta orientasi translasi empat generator linier. Diagram benda bebas dari seluruh sistem dapat diamati pada Gambar 2



**Gambar 2.** (a) Diagram benda bebas tangul dan (b) diagram benda bebas generator linier

Respon getaran yang terjadi pada generator linier mengakibatkan terjadinya fenomena induksi elektromagnetik dari gerak relatif antara getaran translasional massa magnet dengan lilitan kumparan yang terpasang di dalam generator.

Persamaan hukum faraday dapat dituliskan sebagai berikut.

$$E = N \cdot l \cdot B \cdot \dot{x}(t) \quad (1)$$

Dimana parameter  $E$  merupakan tegangan listrik induksi,  $N$  adalah jumlah lilitan kawat konduktor,  $B$  merupakan besar fluks magnet,  $l$  adalah tinggi gulungan lilitan, dan  $\dot{x}(t)$  merupakan respon kecepatan massa getaran massa magnet.

Dengan diketahuinya tegangan induksi, maka daya  $P$  yang dihasilkan dapat dihitung sebagai berikut.

$$P = E \cdot I \quad (2)$$

Jika  $I$  adalah arus listrik yang mengalir dimana  $I = \frac{E}{R}$  dan parameter  $R$  adalah nilai hambatan listrik rangkaian generator, maka persamaan daya akan menjadi

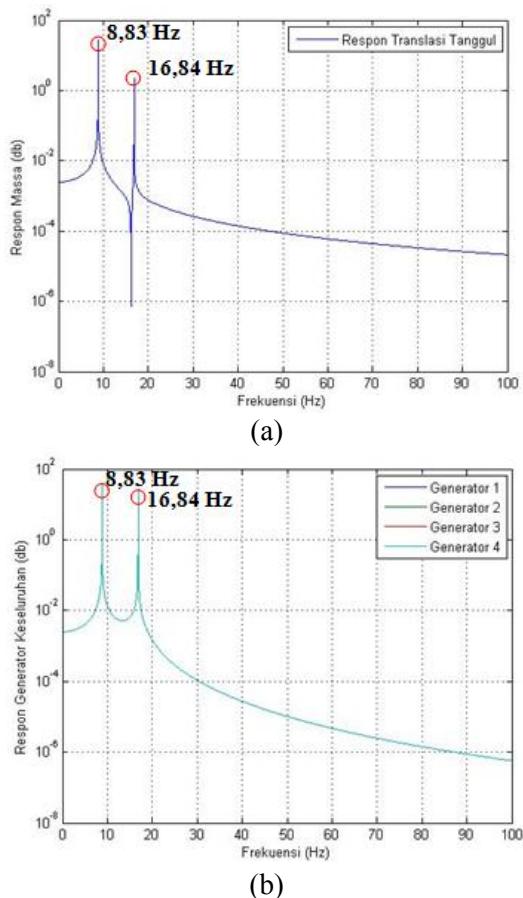
$$P = \frac{E^2}{R} \quad (3)$$

Beberapa parameter-parameter dari tangul yang digunakan dalam analisis selanjutnya dirangkum dalam tabel 2.

**Tabel 2.** Beberapa parameter sistem pembangkit

Variabel	Nilai	Satuan
Massa Magnet ( $m$ )	0.174	Kg
Kekakuan Pegas Generator ( $k$ )	1800	N/m
Massa Tanggul ( $M$ )	12	Kg
Panjang Tanggul ( $L$ )	1	m
Massa Inersia Polar Tanggul ( $J$ )	1	Kg.m <sup>2</sup>
Kekakuan Pegas Tumpuan Tanggul ( $K$ )	40000	N/m
Hambaran Kawat ( $R_c$ )	$7 \times 10^3$	Ohm
Amplitudo Gangguan ( $Y$ )	0.02	M
Jumlah Lilitan Kawat ( $N$ )	3000	Lilitan
Densitas Fluks Magnet NdFeb N35 ( $B$ )	1.2	Tesla
Panjang Efektif Lilitan Kawat ( $l$ )	0.03	M

Respon frekuensi sistem pembangkit baik secara teoritik dari massa tanggul maupun massa magnet generator linier ditunjukkan oleh gambar 3. Pada Gambar 3 terlihat ada dua harga frekuensi pribadi yang dominan. Harga frekuensi yang muncul adalah 8.83 Hz dan 16.84 Hz. Frekuensi pertama merupakan frekuensi modus getar translasi massa tanggul sedangkan frekuensi kedua adalah frekuensi modus getar translasi massa magnet.



**Gambar 3.** Respon frekuensi teoritik yang dicuplik dari (a) gerak translasional tanggul dan (b) gerak translasional massa magnet generator

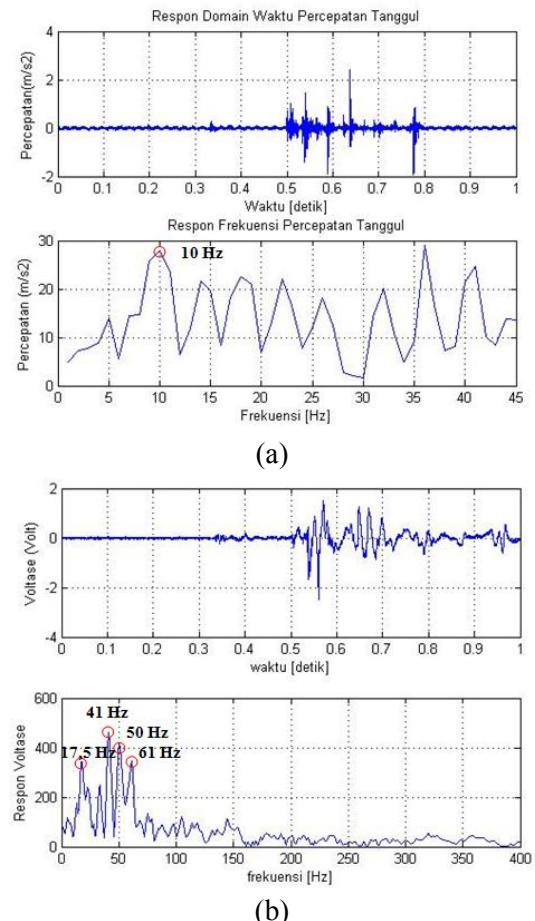
Hal ini dikarenakan posisi tumbukan yang dilakukan tepat di titik tengah tanggul dimana titik tersebut menjadi titik pusat massa sekaligus titik

perputaran massa tanggul. Akibatnya, modus getar rotasional tanggul tidak terlihat signifikan dan pengaruhnya dapat diabaikan. Respon frekuensi yang sama juga ditunjukkan oleh masing-masing generator. Hal ini dikarenakan generator berada dalam spesifikasi yang sama.

Selain itu, model tanggul yang simetris juga mengakibatkan hal yang demikian ditambah dengan posisi pemasangan generator yang masing-masingnya ekuivalen terhadap pusat massa seperti yang terlihat pada gambar 8(a) dan keterangannya.

### Analisis Hasil Pengujian (Eksperimen)

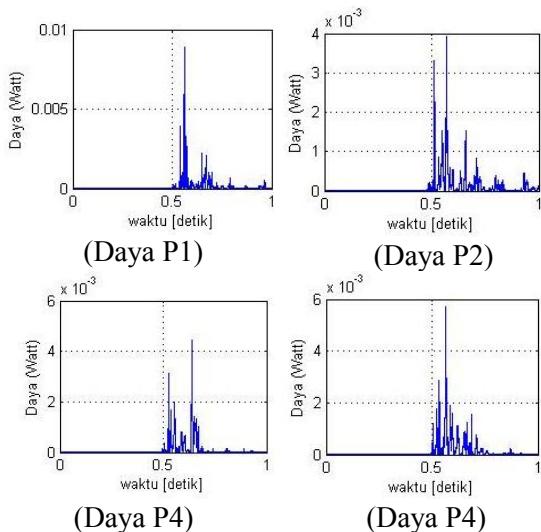
Pengujian dilakukan dengan melewati satu sepeda motor ke sistem pembangkit. Motor diasumsikan melintasi tanggul tepat di tengah tanggul. Unjuk kerja dan karakteristik gangguan generator diukur dimulai dari generator P1 berurutan sampai generator P4. Gambar 4 memperlihatkan hasil pengukuran percepatan pada tanggul dan voltase yang dibangkitkan oleh generator linier pada pembangkit P1.



**Gambar 4.** (a) Respon gangguan dari tanggul. (b) Tegangan listrik keluaran generator P1

Gambar 4 menunjukkan bahwa saat kedua motor secara berurutan melintasi tanggul, getaran pada tanggul sangat cepat mengalami peredaman, berbeda dengan voltase yang dibangkitkan oleh tanggul. Voltase yang dibangkitkan dalam fungsi waktu masih mengalami getaran cukup lama dibanding getaran tanggul yang cepat sekali teredam. Dari spektrum frekuensi, tanggul juga satu frekuensi yang diikuti oleh frekuensi harmoniknya. Frekuensi harmonik ini kemungkinan muncul akibat tumbukan / kontak yang berulang yang terjadi pada massa generator yang disebabkan besarnya kontak awal pada saat tumbukan.

Daya keluaran dari masing-masing generator dihitung dihitung dengan persamaan daya yang telah dijabarkan oleh persamaan 3. Hasil perhitungan daya dapat dilihat pada gambar 5.



**Gambar 5.** Hasil perhitungan daya dari masing-masing generator

Data-data hasil pengujian direkapitulasi dan ditampilkan pada tabel 3.

**Tabel 3.** Tabel data hasil pengujian dan hasil perhitungan daya

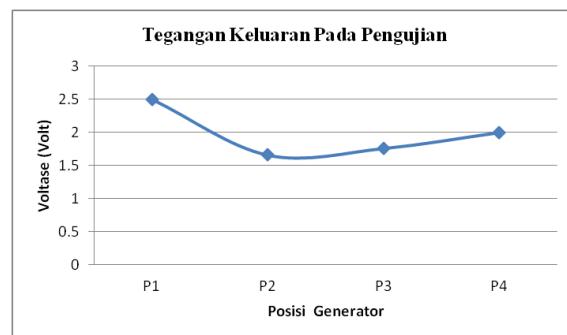
Generator	Amplitudo Percepatan Tanggul ( $m/s^2$ )	Frekuensi Tanggul yang Muncul (Hz)	Frekuensi Tegangan yang Muncul (Hz)	(*) Amplitudo Tegangan Bangkitan (Volt)	Daya Maksimum (Watt)
P1	2.43	10	17,5	2.5	$8,9 \times 10^{-3}$
P2	1.73	8	19	1.66	$3,9 \times 10^{-3}$
P3	1.88	7	21	1.76	$4,4 \times 10^{-3}$
P4	2.16	7	18	2	$5,7 \times 10^{-3}$
Total				7.92	$2,3 \times 10^{-2}$

(\*) Harga yang diambil adalah harga maksimum pada rentang waktu tertentu pada saat pengujian

Data hasil pengujian yang telah dipaparkan sebelumnya menunjukkan bahwa frekuensi respon

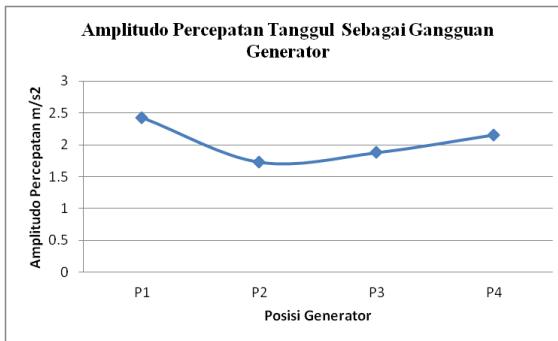
sistem yang terukur baik yang tercuplik dari respon fungsi frekuensi tanggul maupun dari respon frekuensi tegangan merupakan representasi dari respon frekuensi struktur sistem pembangkit. Frekuensi tanggul muncul pada harga 7 Hz, 8 Hz, dan 10 Hz. Sedangkan frekuensi generator terukur dengan nilai frekuensi berkisar dari harga 17.5 Hz, 18 Hz, 19 Hz, dan 21 Hz. Adapun banyaknya puncak dari grafik respon frekuensi yang telah ditampilkan menunjukkan bahwa terdapat banyak derajat kebebasan yang selama pengamatan diabaikan namun terjadi dalam kondisi riil. Hal ini mengakibatkan frekuensi pribadi sistem yang munculpun dalam jumlah yang banyak dan dominan pada harga-harga tertentu.

Dari hasil pengujian yang telah terangkum pada tabel 3, dapat ditarik beberapa hubungan antara beberapa variabel dan dapat disajikan dalam bentuk grafik. Grafik pertama yaitu pada gambar 6, dimana grafik tersebut mengilustrasikan posisi generator dengan tegangan yang dihasilkan oleh masing-masing generator tersebut.



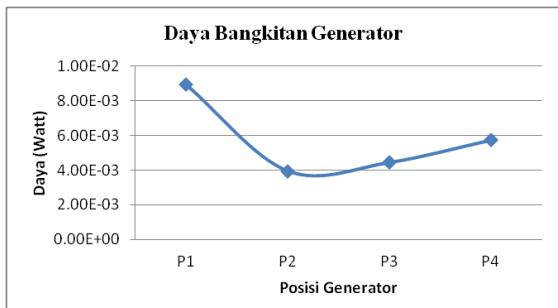
**Gambar 6.** Grafik amplitudo tegangan bangkitan serta posisi generator

Posisi generator yang dipasang dekat dengan pusat massa dan sekaligus tempat terjadinya gangguan yaitu P2 dan P3 menghasilkan tegangan lebih kecil dari generator P1 dan P4 yang terpasang agak jauh dari pusat massa dan pusat gangguan. Adapun penyebab yang memungkinkan hal ini terjadi disebabkan oleh pengaruh amplitudo percepatan tanggul yang terjadi dan sekaligus merupakan faktor eksitasi gangguan ke generator. Amplitudo percepatan tanggul juga memiliki tren grafik yang sama dengan tegangan yang dihasilkan. Seperti yang diilustrasikan gambar 7.



**Gambar 7.** Grafik amplitudo gangguan percepatan tanggul ke generator

Jika frekuensi osilasi gangguan dari tanggul yang bekerja pada keempat generator berkisar pada harga yang sama beserta dengan faktor perbesaran yang dimiliki oleh keempat generator itu sendiri, maka praktis hanya faktor harga simpangan gangguan atau amplitudo gangguan yang terjadi pada tumpuan generator saja yang akan mempengaruhi besar tegangan listrik yang akan dihasilkan. Fenomena yang sama juga terjadi pada daya yang dihasilkan masing-masing generator karena daya yang dihasilkan sebanding dengan tegangan bangkitan (Gambar 8).



**Gambar 8.** Grafik daya keluaran pada setiap posisi generator

Terdapat pengaruh posisi pemasangan generator yang dipasang berjarak dari pusat massa tanggul yang juga sebagai pusat perputaran massa-nya. Pada kondisi riil, ada kemungkinan massa tanggul mengalami pergerakan orientasi sudut akibat terjadinya momen inersia polar serta adanya perbedaan titik perputaran massa yang sebelumnya diidealisasikan sama dengan pusat massa tanggul dengan titik perputaran massa yang sebenarnya. Hal ini mengakibatkan besar defleksi tanggul yang diteruskan sebagai eksitasi ke generator, memiliki harga yang besar pada generator yang terpasang jauh dari pusat massa. Dalam kondisi teoritik adanya pergerakan orientasi sudut tersebut diabaikan karena harganya sangat kecil.

Dapat disimpulkan bahwa besarnya harga gangguan ke generator berupa percepatan tanggul

yang terjadi, mempengaruhi besar simpangan tanggul yang mengeksitasi generator serta mempengaruhi besar nilai tegangan listrik yang dapat dibangkitkan oleh generator tersebut. Besarnya percepatan merupakan representasi dari besarnya gaya impuls yang diperoleh sistem dari tumbukan kendaraan. Perbedaan gaya gangguan dapat dipengaruhi oleh kecepatan kendaraan yang mengeksitasi sistem pembangkit tersebut.

Sementara itu, dengan menggabungkan generator secara parallel, maka model pembangkit akan menghasilkan tegangan bangkitan total sebesar 7.92 Volt dan daya total maksimum sebesar  $2.3 \times 10^{-2}$  Watt dalam satu kali lindasan sepeda motor.

## Hasil dan Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini dijabarkan dalam beberapa poin berikut ini.

- Tumbukan pada tanggul akan mengeksitasi pembangkit pada frekuensi pribadi tanggul dan generator listrik linier. Untuk itu perlu dilakukan optimisasi desain tanggul dan generator untuk mendapatkan energy optimal. Pada model sederhana ini secara teoritik terdapat dua frekuensi pribadi yang dominan yaitu, 8.83 Hz dan 16.84 Hz.
- Daya maksimum yang terpanen oleh generator dalam satu kali lindasan dengan voltase 2.5 Volt adalah  $8.9 \times 10^{-3}$  Watt. Sedangkan tegangan total yang dihasilkan empat generator sebesar 7.92 Volt dan total daya  $2.3 \times 10^{-2}$  Watt.
- Faktor yang mempengaruhi jumlah energi yang dihasilkan adalah percepatan yang diterima oleh generator yang tergantung dari energi kinetik akibat pengaruh massa dan kecepatan yang diberikan kendaraan ke sistem pembangkit.

## Referensi

1. Suliyanti, R., "Evaluasi Faktor Peningkatan Konsumsi Bahan Bakar Minyak (BBM) oleh Transportasi", *Jurnal PDII LIPI*, Vol.IV No.1 2009.
2. Cottone, F., 2011, "Introduction of Vibration Energy Harvesting", Paris:University of Paris Est.
3. Yildiz, F., 2009, "Potential Ambient Energy-Harvesting Source and Techniques". *The Journal of Technology Studies*.
4. <http://phys.org> ,2011, "speed bump

- device traffic energy Electricity”.
- 5. Susanto, R., 2010, Rancang Bangun Mekanisme Pemanen Energi Getaran Dengan Metode Elektromagnetic dan Aplikasinya Pada Mesin Diesel MTU Type 16V 956TB92 di KRI Kakap- 811. *Thesis Magister Teknik Mesin*, ITS, Surabaya.
  - 6. Harus, L.G. & Umarudin., 2010, “On Development a Human Energy Harvester Driven by Angular Knee Flexing During Walking/Running”, (artikel 00-00) *Jurnal Teknik Mesin*, FTI ITS, Surabaya
  - 7. Harus, L.G. & Umarudin., 2010, “On Development a Human Energy Harvester Driven by Angular Knee Flexing During Walking/Running”, (artikel 00-00) *Jurnal Teknik Mesin*, FTI ITS, Surabaya.
  - 8. Thomson, W.T., & Dahleh, M.D., 1998, Theory of Vibration with Applications 5th edition. Prentice-Hall, Inc: New Jersey.
  - 9. Hendrowati, W., Daryanto, B.W., & Harus, L.G., 2012. “On Development of a Vibration Energy Harvesting Mechanism with Different Wire Winding”, *Jurnal Teknik Mesin*, Vol.12. No.1.