

STUDI EKPERIMEN TENTANG *MULTIPURPOSE PENDULUM* SEBAGAI *ENERGY HARVESTER* DAN *VIBRATION ABSORBER*

Ahmad Syuhri¹, Widyono Hadi², Achmad Fitoyo¹, Skriptyan Syuhri¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember

²Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

Email: ahmad.syuhri@unej.ac.id

Abstrak

Seiring dengan perkembangan dibidang elektronik dan teknologi material, saat ini peralatan elektronik dapat dibuang sekecil dan sehemat (energi) mungkin. Sensor – sensor elektrik untuk kebutuhan monitoring, biasanya hanya membutuhkan daya pada rentang milivolt. Sehingga sensor tersebut dapat ditenagai dari sumber daya yang memanfaatkan lingkungan sekitar, sebagai contohnya tenaga surya dan angin. Dengan catatan lingkungan tersebut mempunyai sinar matahari ataupun angin yang cukup untuk dikonversi menjadi listrik dan memenuhi daya sensor. Untuk kasus pada lingkungan yang hanya ada energi vibrasi, seperti sensor mitigasi kebencanaan, struktur dalam gedung ataupun jembatan dan kendaraan baik darat, laut maupun udara, diperlukan suatu energy harvester yang tepat untuk memenuhi daya listrik pada sensor tersebut. Tujuan dari penelitian adalah merancang multipurpose pendulum sebagai energy harvester dan vibration absorber (MPEH). Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian secara ekperimental dengan memberikan input baik dengan impulse maupun harmonik. Secara umum konsep tersebut menggunakan pendulum dengan arah rotasi ke dua sumbu, yaitu X and Z. Semua gerakan pendulum akan disearahkan gerakannya (rectification) hingga putaran yang masuk ke generator hanya akan berputar ke salah satu arah baik CW ataupun CCW pada sumbu X.

Kata kunci: *multipurpose pendulum; self-powered device; vibration absorber; energy harvesting*

Pendahuluan

Perkembangan tentang perangkat elektronik, system elektromekanik dan sensor wireless yang hemat energi telah berkembang pesat saat ini. Aplikasi tersebut biasanya digunakan untuk mewujudkan *green concept* seperti *green city* ataupun *green building* dimana membutuhkan sensor untuk mengukur data lalu lintas, data parkir, data cuaca dan lainnya. Di sisi lain *wireless sensor* biasanya dipakai disuatu tempat yang terpencil dan sulit untuk dijangkau seperti, struktur bangunan (jembatan, gedung, pesawat terbang) untuk memonitor struktur, mitigasi kebencanaan baik di darat ataupun laut dan *GPS tracker* (Ahmed dkk, 2017).

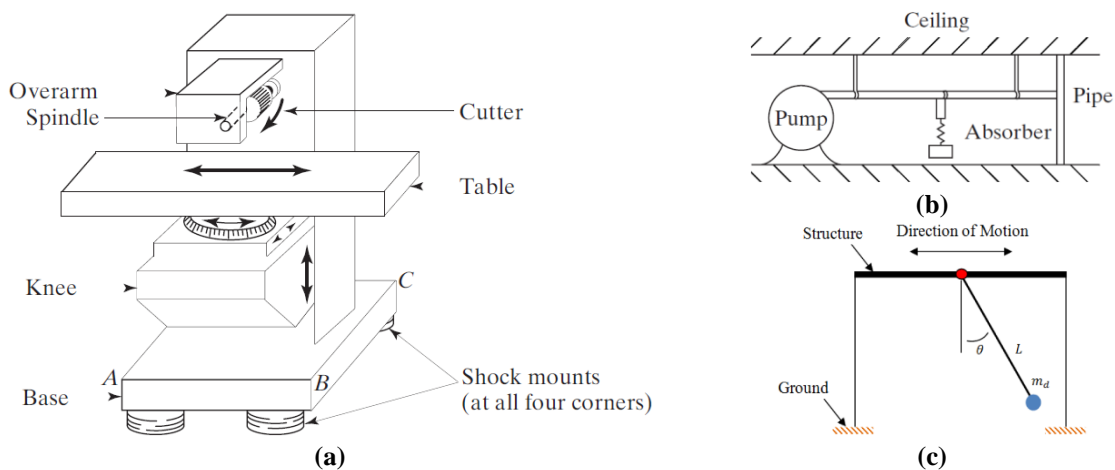
Pada dasarnya perangkat elektronik tersebut mendapatkan sumber energi dari baterai yang mempunyai rentang *lifetime* yang lebih pendek dibandingkan dengan *lifetime* perangkat elektronik itu sendiri. Penggantian ataupun pengecasan yang dilakukan secara berkala membutuhkan waktu dan biaya yang tidak sedikit, jika sensor tersebut terletak didaerah yang sulit. Sehingga dibutuhkan suatu sumber daya yang *reliable*, *battery-less* dan *self-powered sensor* agar ramah lingkungan dan *maintenance-free* (Malaji and Ali, 2015). Oleh karena itu, *energy harvesting* mendapat perhatian dari peneliti dan praktisi.

Prinsip dasar dari *energy harvester* adalah mengonversi energi dari lingkungan sekitar dirubah menjadi energi listrik sehingga dapat menjadi pengganti baterai atau pengisi dari baterai itu sendiri. Sumber getaran dapat berasal dari pepohonan, infrastruktur sipil, gedung, jembatan, pergerakan manusia dan mesin-mesin yang semuanya memiliki karakteristik dan rentang frekuensi yang berbeda (Malaji and Ali, 2015). Perkembangan *energy harvester* saat ini hanya cocok untuk *harvester* pada kendaraan. Begitu juga dengan *piezoelectric energy harvester* yang lebih cocok untuk beroperasi pada infrastruktur sipil daripada digunakan pada kendaraan. Sehingga dibutuhkan suatu *energy harvester* yang mampu mengakomodir kesemua frekuensi, fleksibel dengan prinsip *plug and play*, aman dengan definisi kegagalan kinerja *harvester* tidak akan mengganggu kinerja system utama dan mampu meredam getaran yang berlebih.

Pada umumnya, suatu *energy harvester*, khususnya dari sumber getaran, mempunyai tiga komponen utama, yaitu *energy absorber*, transmisi dan unit elektrik. *Energy absorber* adalah suatu system yang didesain untuk menyerap energi vibrasi dari sistem utama (Rao, 2011). Transmisi digunakan untuk mengubah, memperbesar ataupun memperkecil Gerakan dari *energy absorber* (Lee and Chung, 2016). Unit elektrik adalah suatu sistem untuk merubah

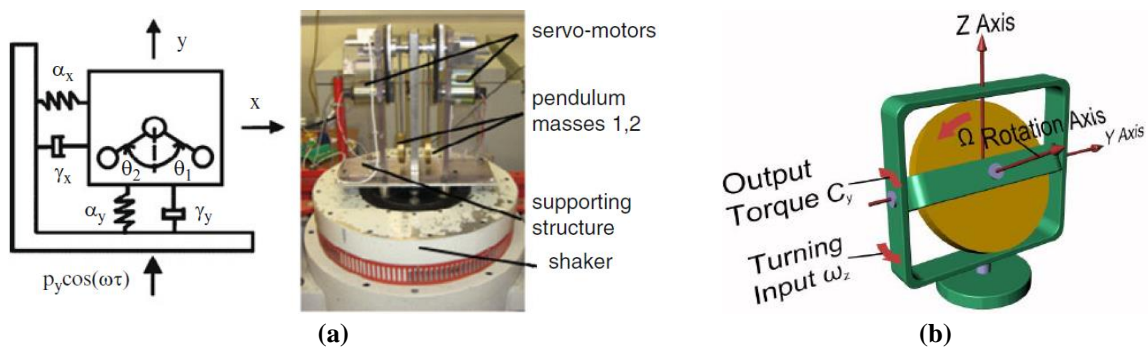
energi mekanik menjadi energi listrik yang dapat langsung digunakan ataupun disimpan dalam bentuk baterai sesuai kebutuhan (Zhang dkk, 2015). Dari sisi mekanis, *energy absorber* dan transmisi memegang peran penting karena menjadi input dari unit elektrik. Sehingga besar kecilnya voltase yang dihasilkan sangat berpengaruh dari kedua sistem tersebut.

Berdasarkan prinsip kerjanya, *energy absorber* pada getaran dibagi menjadi dua yaitu shock absorber dan dynamic vibration absorber (DVA). Shock absorber biasanya dipasang secara in-line, dimana menjadi tumpuan atau konektor dari massa utama dan base/ground. Secara teknis pemasangan, kelemahan dari shock absorber ini adalah pemasangan secara seri yang membuatnya kurang fleksible, membutuhkan base/ground dan kegagalan kerja akan mempengaruhi kinerja dari sistem utama yang ditunjukkan pada Gambar 1(a). Berbeda dengan shock absorber, DVA mempunyai keunggulan dalam fleksibilitasnya, yaitu dapat dipasang secara seri maupun parallel seperti yang ditampilkan pada Gambar 1(b) dan 1(c). Sehingga tidak memerlukan base/ground dan proses perbaikan/perawatan tidak akan mengganggu sistem utama.



Gambar 1.(a) Pemasangan shock absorber pada mesin milling (Rao, 2011); (b) Pemasangan DVA pada instalasi pompa dan pipa (Lee and Chung, 2016); dan (c) DVA menggunakan pendulum pada suatu struktur (Lourenco, 2011)

DVA dengan tipe pendulum mass, Gambar 1(c), mempunyai keuntungan dalam kemampuan menyerap energi melalui variasi lengan dan massa dari pendulum itu sendiri dibandingkan dengan tipe constant mass, Gambar 1(c), dimana hanya mengandalkan variasi massa saja (Deraemaeker and Soltani, 2016). Oleh karena itu, dalam beberapa decade ini para peneliti memanfaatkan pendulum sebagai *energy harvester* (Liu, 2012; Kecik, 2013; Kecik dkk, 2013; Ding dkk, 2015; Iliuk dkk 2013; Wiercigroch dkk, 2011), yang salah satu contohnya dapat dilihat pada Gambar 2(a). Tetapi, kebanyakan pendulum tersebut hanya mampu memanen energi pada satu axis saja (Tang and Zuo, 2012). Padahal getaran pada suatu sistem bekerja pada multi-axis, seperti pada kendaraan yang mempunyai gerakan rolling, bouncing, dan pitching (Jazar, 2009), ataupun struktur bangun yang dimodelkan secara 3D (Chik dkk, 2016). Oleh karena itu, diperlukan suatu pendulum yang mampu mengakomodir banyak axis agar tidak banyak energi getaran yang terdisipasi.

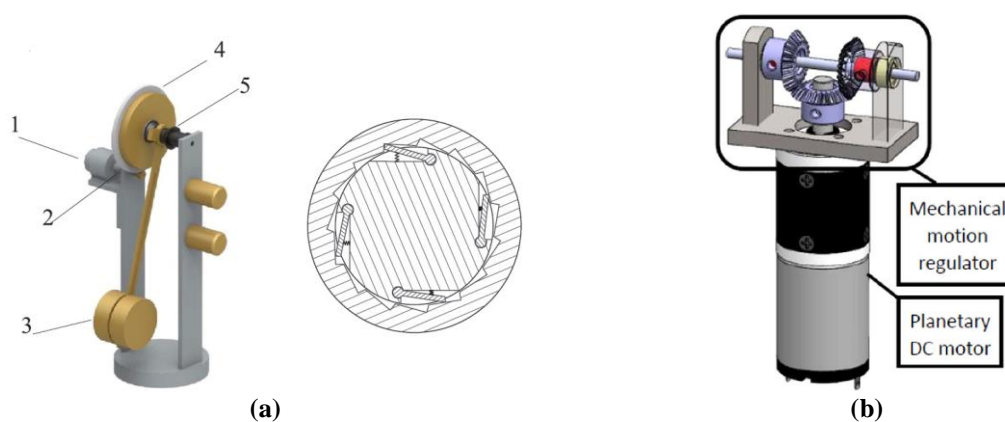


Gambar 2.(a) *Pendulum energy harvester* (Wiercigroch dkk, 2011); and (b) Konsep giroskop (Passaro dkk, 2017)

Salah satu sistem yang mampu menangkap banyak getaran ada giroskop, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2(b), dimana memiliki kemampuan untuk mengakomodir gerakan pada tiga axis (Passaro dkk, 2017). Prinsip

giroskop inilah yang nantinya akan digunakan sebagai harvester mechanism untuk multipurpose pendulum. Selanjutnya, pemilihan transmisi sangatlah penting agar mampu meneruskan gerakan multipurpose pendulum tersebut yang bekerja pada multi-axis dan tidak berotasi secara penuh. Tetapi, berotasi pada sudut tertentu dengan osilasi (reciprocating). Selain itu, transmisi haruslah didesain sedemikian rupa agar gerakan osilasi sekecil mungkin dari pendulum dapat diperbesar atau diperkecil kecepatannya sesuai dengan kebutuhan torsi dari generator.

Perkembangan transmisi untuk energy harvesting telah dilakukan oleh beberapa peneliti agar didapatkan efisiensi energy harvesting yang tinggi. Zhang (2010) menyarankan untuk menyearahkan gerakan pada transmisi sebelum masuk ke generator agar tidak terjadi rugi inersia dan mengurangi fluktuasi pada saat electric discharge. Li dkk (2013) memperkenalkan transmisi penyearah gerakan (motion rectifier) yang mampu menyearahkan gerakan translasi bolak-balik (reciprocating) menjadi putaran searah yang diaplikasikan untuk energy harvester pada shock absorber kendaraan. Marszal dkk (2017) memanfaatkan ratcheting wheel yang biasa digunakan pada mekanisme jam sebagai energy harvester pada pendulum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(a). Tetapi mekanisme tersebut hanya mampu memutar generator ketika pendulum bekerja ke arah counter-clockwise (CCW) saja. Ketika pendulum berputar ke arah sebaliknya atau *clockwise* (CW), pendulum tidak akan memutar generator sebagai konsekuensi dari *freewheel* tersebut.



Gambar 3. Energy harvester menggunakan (a) Ratcheting freewheel (Marszal dkk, 2017); dan (b) Mechanical motion rectifier (Liang dkk, 2016)

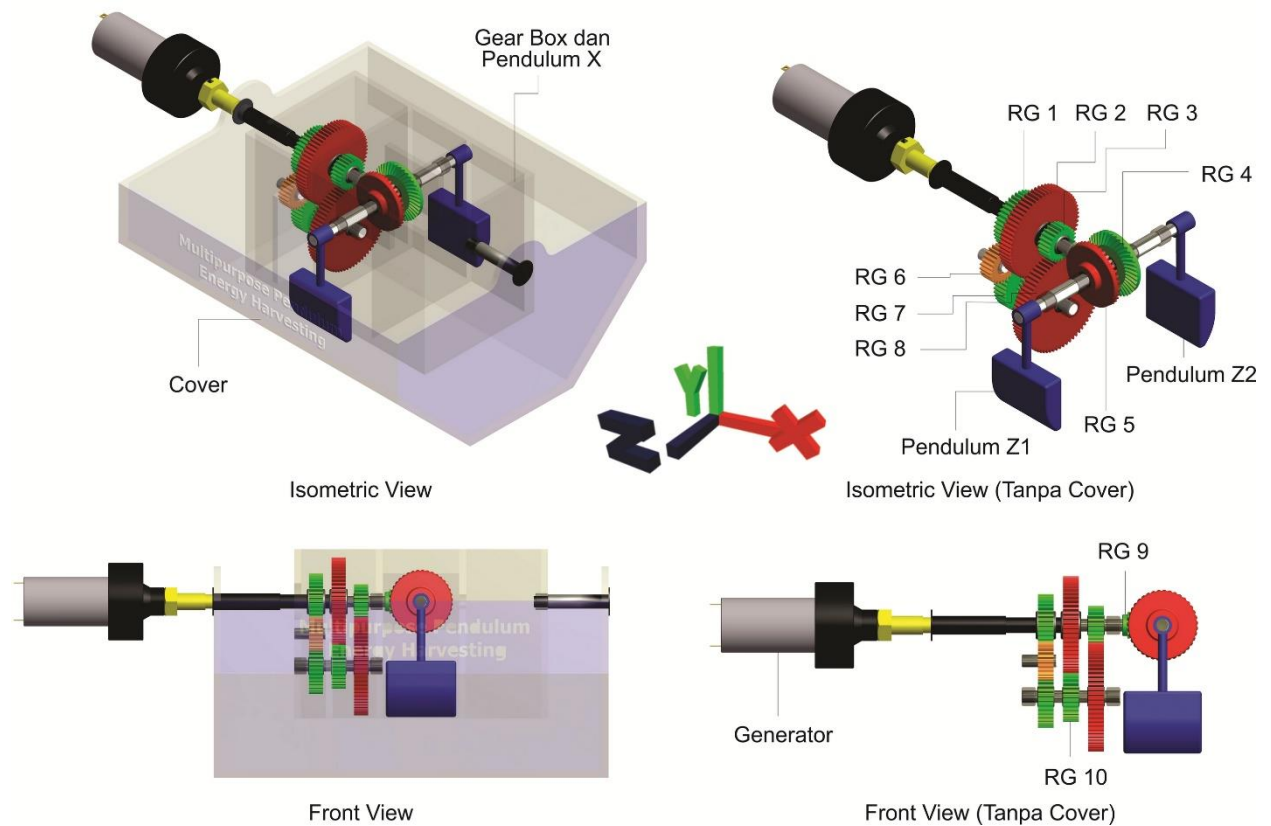
Liang dkk (2016) memperbaiki desain dari Li dkk (2013) dengan memanfaatkan tiga buah bevel gear untuk merubah putaran dengan sudut 90 derajat, dua buah one-way bearing untuk membuat putaran searah dan planetary gear untuk memperbesar kecepatan yang masuk ke generator seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(b). Desain tersebut mampu menyearahkan gerakan dari gerak osilasi ke arah CW dan CCW menjadi satu arah. Tetapi, desain tersebut hanya mampu memanen energi ke satu arah axis saja. Berdasar dari prinsip kerja tersebut, mekanisme tersebut akan dikembangkan dengan susunan roda gigi agar mampu mengakomodir semua gerakan dari *multipurpose pendulum* yang memanfaatkan prinsip giroskop.

Dengan memanen energi vibrasi dari sekitar lingkungan tersebut, nantinya MPEH akan mengonversi energi yang dapat digunakan untuk menyalakan GPS, charging baterai, penerangan dan powerless sensor. Sensor tsunami atau penerangan disekitar pantai dapat ditenagai oleh MPEH. Getaran pada pepohonan dan animal motion dapat dimanfaatkan untuk memasang GPS ataupun sensor lainnya. Human motion dapat dimanfaatkan untuk survivor di tempat yang tidak ada listrik. Getaran yang ada pada jembatan dapat digunakan sebagai penerangan atau rambu lalu lintas yang berbasis LED yang mana low energy. Getaran pada gedung dan mesin industry dapat digunakan untuk pemasangan powerless sensor untuk structural health monitoring. Pada kendaraan darat dan laut, dapat digunakan untuk mengurangi beban kerja pada aki kendaraan yang didapatkan dari alternasi mesin. Berdasarkan keunggulan-keunggulan yang telah dipaparkan tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji secara eksperimen dari desain MPEH. Struktur dari penelitian ini meliputi pemaparan desain konseptual yang dijelaskan pada Bab Pengembangan Model. Hasil pengujian dari fabrikasi MPEH akan diuraikan pada Bab Hasil dan Pembahasan. Potensi dan batasan akan dirangkum pada Bab Kesimpulan.

Pengembangan Model

Secara umum konsep MPEH ditunjukkan pada Gambar 4 (bagian Isometric View dan Front View), yang mana terdiri dari susunan *bevel gear*, roda gigi lurus, *planetary gear* dan generator. Gerakan rotasi pada arah Z akan ditangkap oleh Pendulum Z1 dan Z2. Terdapat *one-way bearing* yang menghubungkan antara RG 4 dan RG 5 dengan poros transmisi Pendulum Z1 dan Z2. *One-way bearing* tersebut dipasang secara berlawanan. Sehingga, RG 5 hanya dapat mentransmisikan gerakan dari Pendulum Z1 ke arah CW saja, dan *coupling* akan lepas ketika Pendulum Z1

berputar ke arah CCW. Sebaliknya, RG 4 hanya akan berotasi ke arah CCW saja. Hal ini mengakibatkan RG 9 sebagai *bevel pinion* berotasi ke satu arah putaran saja, yaitu rotasi CCW ke arah sumbu X.



Gambar 4. Konsep MPEH

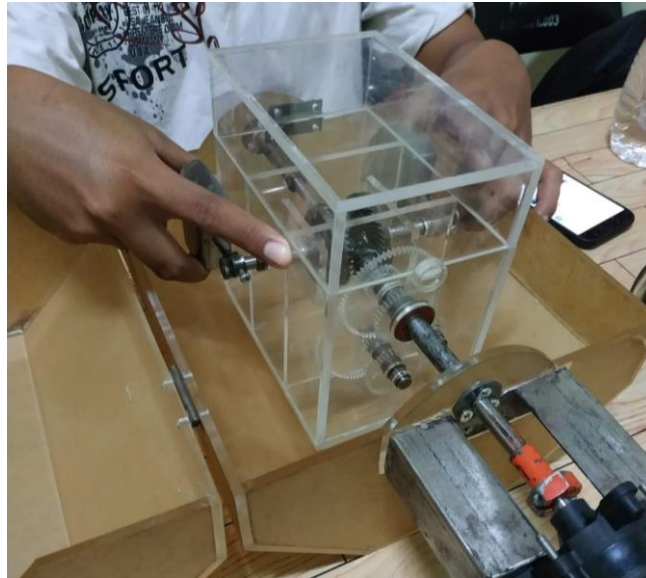
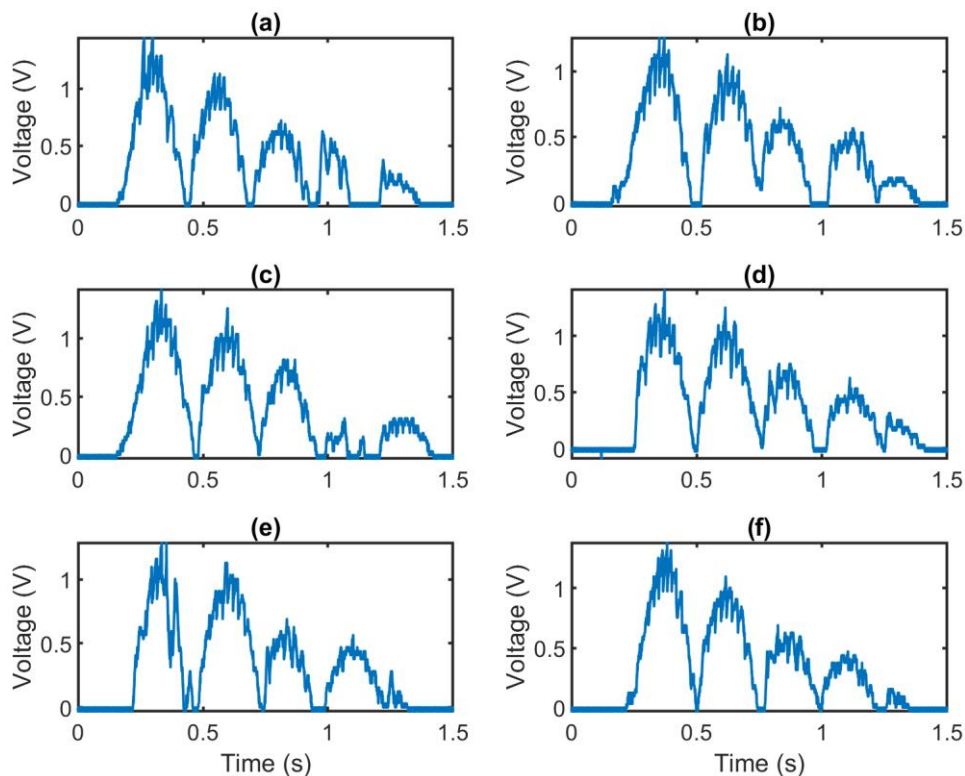
Di sisi lain, rotasi pada arah X akan di-*harvest* oleh Pendulum X, yang mana tersusun oleh berat dari Pendulum Z beserta dengan *inner cover*. Roda gigi yang dinotasikan dengan RG 1-3, RG 6-8 dan RG 10 berfungsi sebagai penyearah putaran agar didapatkan satu output putaran, yaitu ke arah CCW dengan memanfaatkan *one-way bearing*. Putaran dari RG 9 yang berasal dari Pendulum Z dan RG 1-2 yang berasal dari pendulum X ditransmisikan ke dalam satu poros utama. Agar dapat saling bekerja secara kontinyu, *one-way bearing* dipasang pada semua roda gigi tersebut.

Jika putaran pada RG 9 lebih tinggi dari RG 1 dan 2, maka Pendulum Z akan mentransmisikan daya. Hal ini juga berlaku untuk Pendulum X. Selanjutnya, putaran dari poros utama akan diperbesar putarannya kurang lebih 50 kali oleh *planetary gear* sebelum ke generator. Oleh karena itu, baik pendulum X dan Z dapat mempunyai beban mekanik saja ataupun terbebani secara mekanik dan elektrik tergantung dari kecepatannya.

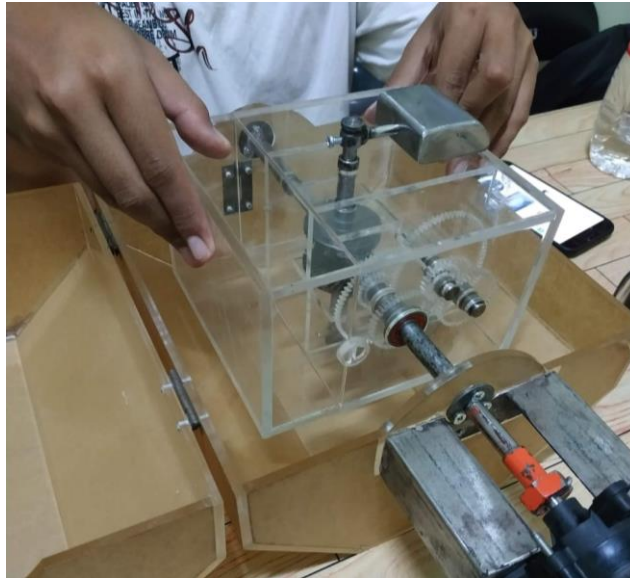
Hasil dan Pembahasan

Untuk mendapatkan kinerja dari MPEH, pengujian dilakukan dengan cara bouncing test untuk mendapatkan kinerja Pendulum Z, rolling test untuk analisa pendulum X. Pengujian tersebut dilakukan baik secara *impulse* maupun *random*. Hasil pengujian adalah voltase generator yang diakuisisi oleh osiloskop.

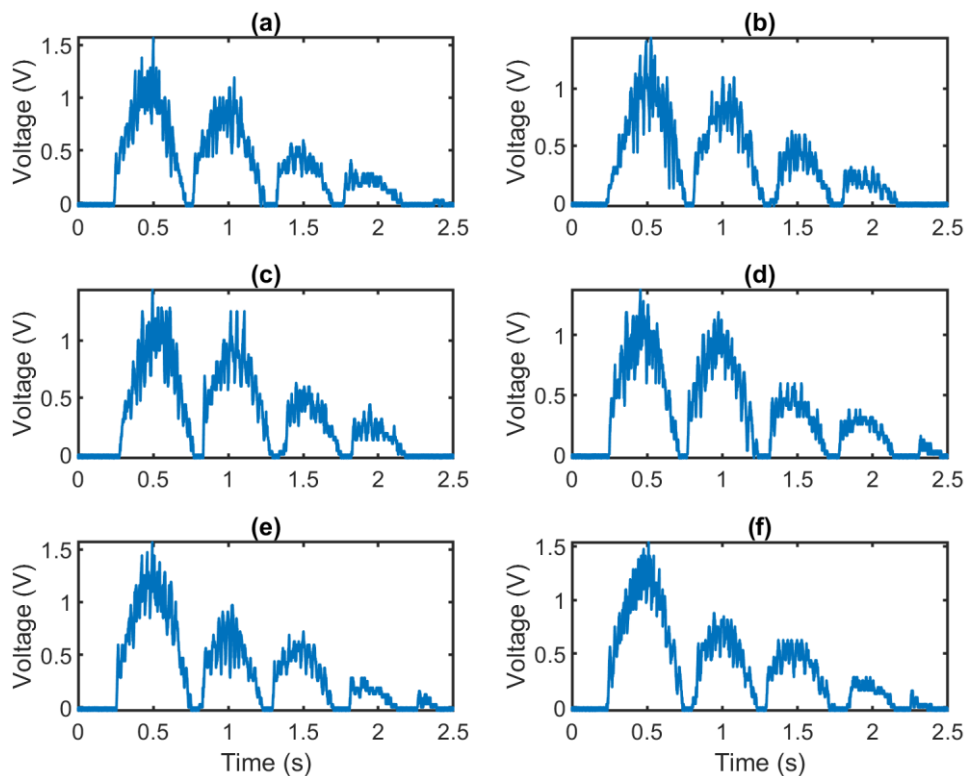
Bouncing test dilakukan dengan melepaskan pendulum Z pada sudut 90° , sehingga pendulum dapat bergerak secara bebas (*free swing*) hingga berhenti. Gambar 5 menunjukkan pengujian bouncing test untuk mendapatkan performa Pendulum Z. Selama pengujian dilakukan pengulangan sebanyak enam kali, yang mana hasilnya ditunjukkan pada Gambar 6. Ketika pendulum dilepas dari sudut 90° , pendulum berayun sebanyak kurang lebih lima kali hingga berhenti total sebelum mencapai 1.5 s. Dari enam kali pengujian, didapatkan suatu *pattern* yang sama, yaitu mempunyai nilai puncak sebesar 1.44 V. Penyearah gerakan (*motion rectifier*) membuat semua nilai voltase bernilai positif. Tetapi *ripple voltage* masih terlalu besar, ditandai dengan *trough* atau titik terendah setelah puncak mempunyai nilai nol. Selain itu, masih terdapat *delay* pada akhir-akhir respon ataupun ketika pendulum berubah arah, yang diakibatkan oleh *backlash* pada sistem komponen roda gigi.

Gambar 5. Pengujian pendulum Z dengan kondisi awal 90° Gambar 6. Hasil pengujian *bouncing test* berupa voltase generator terhadap waktu

Pendulum X diuji dengan metode pengujian yang sama, yaitu dengan memberikan *initial condition* sebesar 90° pada *inner cover* yang terhubung dengan Pendulum Z, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Pengujian dilakukan dengan pengulangan sebanyak enam kali, dan ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan antara voltase generator terhadap waktu yang ditunjukkan pada Gambar 8. Berdasarkan gambar tersebut, gerakan bebas Pendulum X menghasilkan empat puncak, tetapi dengan rentang waktu yang lebih lama dibandingkan dengan Pendulum Z. Hal ini dikarenakan Pendulum X mempunyai berat yang lebih besar dibandingkan dengan Pendulum Z. Sehingga putaran yang dihasilkan menjadi lebih lama. Selain itu, hal tersebut juga dipengaruhi oleh rasio roda gigi yang berbeda antara Pendulum X dan Z terhadap poros utama (*main shaft*). Fenomena yang sama juga terjadi pada Gambar 8, yaitu *voltage drop* dan beberapa *lag* akibat dari *backlash* roda gigi dengan nilai voltase maksimum sebesar 1.57 V.

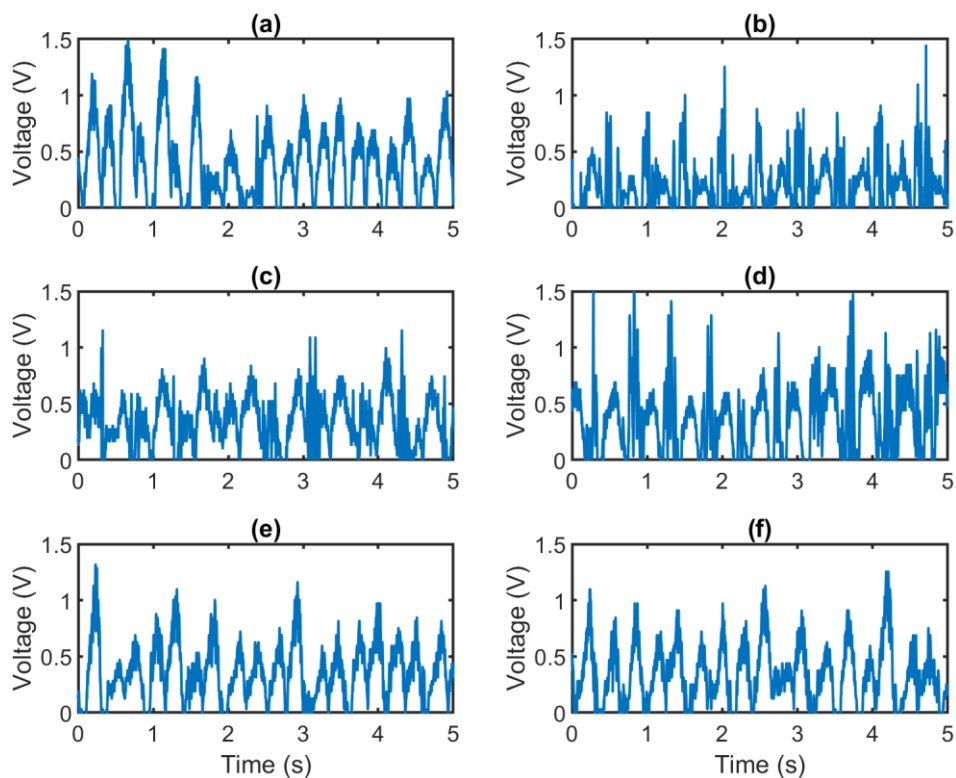


Gambar 7. Pengujian pendulum X dengan kondisi awal 90°



Gambar 8. Hasil pengujian *rolling test* berupa voltase generator terhadap waktu

Pengujian dengan input *random* ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem untuk menghasilkan suatu output yang stabil. Dalam hal ini, sistem dikatakan stabil jika mempunyai *ripple voltage* atau jarak antara *crest* dan *trough* seminimal mungkin. Pengujian dilakukan dengan pengulangan selama enam kali dengan cara diguncangkan ke segala arah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 10. Dengan mengguncangkan ke segala arah, tidak terlihat lagi *lag* atau *delay* pada respon voltase tersebut. Ketika satu pendulum terjadi *lag* akibat *backlash* pada roda gigi, pendulum satunya akan mengisi kekosongan tersebut. *Voltage drop* masih terlihat, meskipun di beberapa respon terdapat respon *trough* tidak sampai bernilai nol. Perbedaan puncak terjadi karena perbedaan rasio roda gigi pada Pendulum X dan Z. Sedangkan perbedaan periode diakibatkan oleh perbedaan berat pendulum. Semua voltase bernilai positif, yang menunjukkan bahwa konsep yang diajukan dapat bekerja dengan baik, yaitu menyearahkan semua rotasi menjadi satu arah rotasi.

Gambar 9. Pengujian Pendulum X dan Z dengan eksitasi *random*Gambar 10. Hasil pengujian MPEH dengan *random input*

Kesimpulan

Dalam makalah ini, prinsip kerja MPEH telah diuraikan dan fabrikasi telah dilakukan. Pengujian alat secara eksperimen telah dilakukan dengan input berupa *impulse* maupun *random*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsep yang telah diajukan dapat menyearahkan gerakan rotasi yang bekerja pada dua sumbu, yaitu sumbu X dan Z, menjadi satu sumbu rotasi X. Meskipun sistem masih memerlukan perbaikan sebagai seperti *backlash* pada roda gigi yang menyebabkan *delay* pada *time response* dan *voltage drop* yang terjadi pada sistem. Hal ini akan digunakan sebagai fokus pengembangan MPEH untuk studi selanjutnya.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh DRPM - KEMENRISTEKDIKTI melalui Skema Penelitian Dasar Tahun Anggaran 2019-2020.

Daftar Pustaka

- Ahmed R., Mir, F. and Banerjee, S., (2017). "A review on energy harvesting approaches for renewable energies from ambient vibrations and acoustic waves using piezoelectricity" *Smart Materials and Structures*, Vol. 26 (8).
- Chik, T. N. T., Zakaria, M. F., Remali, M. A. and Yusoff, N. A., (2016). "Vibration Response of Multi Storey Building Using Finite Element Modelling" *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 136.
- Deraemaeker, A. and Soltani, P., (2016). "A short note on equal peak design for the pendulum tuned mass dampers" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, Vol. 231 (1) pp. 285-291.
- Ding, W., Song, B., Mao, Z. and Wang, K., (2015). "Experimental investigations on a low frequency horizontal pendulum ocean kinetic energy harvester for underwater mooring platforms" *Journal of Marine Science and Technology*, Vol 21 (2) pp. 359-367.
- Iliuk, I., Balthazar, J. M., Tusset, A. M., Piqueira, J. R. C., Rodrigues de Pontes, B., Felix, J. L. P. and Bueno, A. M., (2013). "A non-ideal portal frame energy harvester controlled using a pendulum" *The European Physical Journal Special Topics*, Vol. 222 (7) pp. 1575-1586.
- Inman, D. J., (2009). "*Engineering vibration*", Upper Saddle River, N.J., Pearson/Prentice Hall.
- Jazar, R. N., (2009). "*Vehicle Dynamics: Theory and Application*", New York: Springer Science + Business Media.
- Kecik, K., (2013). "Energy Harvesting of a Pendulum Vibration Absorber" *Przeegląd Elektrotechniczny*, Vol. 89 (7) pp. 169-172.
- Kecik, K., Mitura, A. and Warminski, J., (2013). "Efficiency analysis of an autoparametric pendulum vibration absorber" *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, Vol. 15 (3) pp. 221-224.
- Lee, B.-C. and Chung, G.-S., (2016). "Design and analysis of a pendulum-based electromagnetic energy harvester using anti-phase motion" *IET Renewable Power Generation*, Vol. 10 (10) pp. 1625-1630.
- Li, Z., Zuo, L., Kuang, J. and Luhrs, G., (2013). "Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier" *Smart Materials and Structures*, Vol. 22 (2).
- Liang, C., Wu, Y. and Zuo, L., (2016). "Broadband pendulum energy harvester" *Smart Materials and Structures*, Vol. 25 (9).
- Liu, X., (2012). "*An Electromagnetic Energy Harvesting for Powering Consumer Electronics*", Tesis, Clemson University.
- Lourenco, R., (2011). "*Design, Construction and Testing of an Adaptive Pendulum Tuned Mass Damper*", Tesis, University of Waterloo.
- Malaji, P. V. and Ali, S. F., (2015). "Analysis of energy harvesting from multiple pendulums with and without mechanical coupling" *The European Physical Journal Special Topics*, Vol. 224 (14-15) pp. 2823-2838.
- Marszal, M., Witkowski B., Jankowski, K., Perlikowski, P. and Kapitaniak, T., (2017). "Energy harvesting from pendulum oscillations" *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol, 94 pp. 251-256.
- Passaro, V. M. N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M. and Campanella, C. E., (2017). "Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective" *Sensors*, Vol. 17 (10).
- Rao, S. S., (2011). "*Mechanical Vibrations*" Upper Saddle River, N.J., Pearson/Prentice Hall.
- Tang, X. and Zuo, L., (2012). "Vibration energy harvesting from random force and motion excitations" *Smart Materials and Structures*, Vol. 21 (7).
- Wiercigroch, M., Najdecka, A. and Vaziri, V., (2011). "Nonlinear Dynamics of Pendulums System for Energy Harvesting" *Springer Proceedings in Physics*, Vol. 139 pp. 35-42.
- Zhang, P. S., (2010). "*Design of electromagnetic shock absorbers for energy harvesting for energy harvesting from vehicle suspensions*" Tesis, Stony Brook University.
- Zhang, Y., Zhang, X., Zhan, M., Guo, K., Zhao, F. and Liu, Z., (2015). "Study on a novel hydraulic pumping regenerative suspension for vehicles" *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 352 (2) pp. 485-499.