

Perancangan dan Implementasi Karpet Piezoelektrik untuk Pemanenan Energi

Yundi Supriandani^{1,a)}, Estiyanti Ekawati^{1,2,b)}

¹Pusat Teknologi Instrumentasi dan Otomasi, Institut Teknologi Bandung,
Gedung Inovasi Lt. 8, Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

²Kelompok Keahlian Instrumentasi dan Kontrol,
Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)}yundi@instrument.itb.ac.id

^{b)}esti@instrument.itb.ac.id (corresponding author)

Abstrak

Makalah ini melaporkan desain dan implementasi karpet piezoelektrik untuk memanen energi dari aktivitas jalan dan lompat oleh manusia. Karpet ini dibuat dari lapisan karet yang dilekati oleh matriks keping piezoelektrik. Keping-keping piezoelektrik ini menghasilkan impuls tegangan listrik apabila menerima tekanan. Sumber tegangan ini dihubungkan dengan rangkaian penyearah dan penguat, sehingga arus listrik mengalir dan muatan listriknya dapat dikumpulkan pada sebuah super kapasitor. Perangkat pemanen energi ini juga dilengkapi dengan antarmuka komputer untuk memantau perubahan tegangan pada kapasitor. Antarmuka ini diprogram menggunakan bahasa pemrograman Java. Antarmuka ini juga terhubung dengan modul akuisisi data yang bagian utamanya terdiri dari mikroprosesor dan protokol komunikasi serial RS232. Pengujian kinerja modul pemanen energi ini terdiri dari pengukuran tegangan keping piezoelektrik pada bahan karpet yang berbeda, serta laju pengisian dan pengosongan kapasitor. Pengujian pertama bertujuan untuk memilih bahan karpet yang optimal untuk digunakan. Karpet ini kemudian dilekati keping-keping piezoelektrik yang telah dilapisi resin untuk mencegah kerusakan akibat tekanan yang berlebihan. Selanjutnya, kemampuan pengisian kapasitor diuji dengan uji pukul menggunakan impact hammer, serta uji jalan dan lompat di atas karpet selama 5 menit. Uji jalan menghasilkan tegangan 1.1 Volt pada kapasitor. Adapun konstanta waktu pengosongan kapasitor adalah 78.61 menit. Hasil-hasil ini menunjukkan potensi pengembangan karpet piezoelektrik untuk pemanenan energi.

Kata-kata kunci: Pemanenan energi, Piezoelektrik

PENDAHULUAN

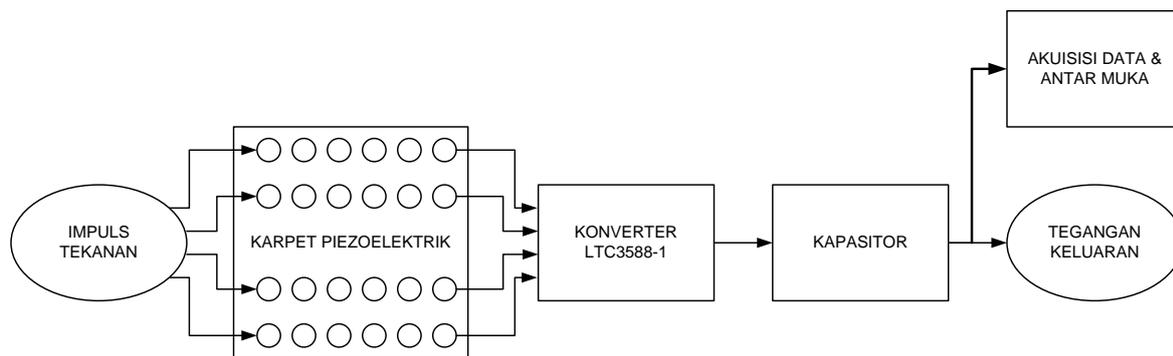
Penelitian di bidang energi terbarukan dewasa ini merupakan bidang yang secara intensif didalami di berbagai negara. Salah satu alternatif sumber energi terbarukan tersebut adalah pemanenan energi mekanik dari berbagai bentuk aktivitas manusia menggunakan bahan piezoelektrik. Bahan piezoelektrik adalah bahan yang menghasilkan tegangan listrik apabila mengalami perubahan dimensi akibat gaya tekanan atau gaya tarik yang dialaminya. Gaya tekan atau tarik ini dapat disebabkan oleh tekanan atau tarikan langsung pada bahan, maupun dalam bentuk getaran yang dialarkan kepada bahan piezoelektrik tersebut.

Kemampuan satu keping piezoelektrik audio yang banyak tersedia di pasar Indonesia untuk menghasilkan energi listrik memang masih sangat kecil, yaitu 1,6nW bila merespon gelombang bunyi 500Hz [1]. Namun bila keping-keping ini dikumpulkan dan dikelola dalam jumlah banyak, maka energi yang dihasilkan dapat diakumulasikan dalam sebuah sistem pemanenan energi [3].

Penelitian ini melanjutkan karya Fajrin, Sofyna dan Ekawati [2] tentang pengujian karakteristik keping piezoelektrik audio untuk memilih jenis keping dan konfigurasi pemasangan yang optimal untuk memanen energi dari langkah manusia. Namun, bahan piezoelektrik yang digunakan pada penelitian tersebut masih beresiko rusak permanen akibat tekanan berlebih. Pada penelitian ini, keping piezoelektrik yang terpilih diletakkan pada sebuah lapisan karet dan tiap keping diberi lapisan resin untuk memperkuat strukturnya.

Untuk mendukung pengamatan kinerja sistem, maka karpet pemanen energi ini dilengkapi dengan modul pengisian kapasitor dan modul antarmuka pengguna (*Human Machine Interface*, HMI) untuk memantau energi yang terkumpul. Perangkat utama modul pengisian kapasitor ini adalah IC LTC3588-1 dan kapasitor 100 μ F. Modul antar muka dibangun menggunakan bahasa pemrograman Java dan terhubung dengan modul akuisisi data yang menggunakan mikroprosesor dan protokol komunikasi serial RS232.

Bagan umum sistem pemanen energi ini ditunjukkan pada Gambar 1. Pada bagian-bagian selanjutnya, disampaikan karakteristik tiap bagian fungsional, desain dan implementasi sistem keseluruhan, pengujian kinerja sistem, analisis hasil pengujian dan ditutup dengan kesimpulan mengenai kinerja sistem serta saran pengembangan lebih lanjut.



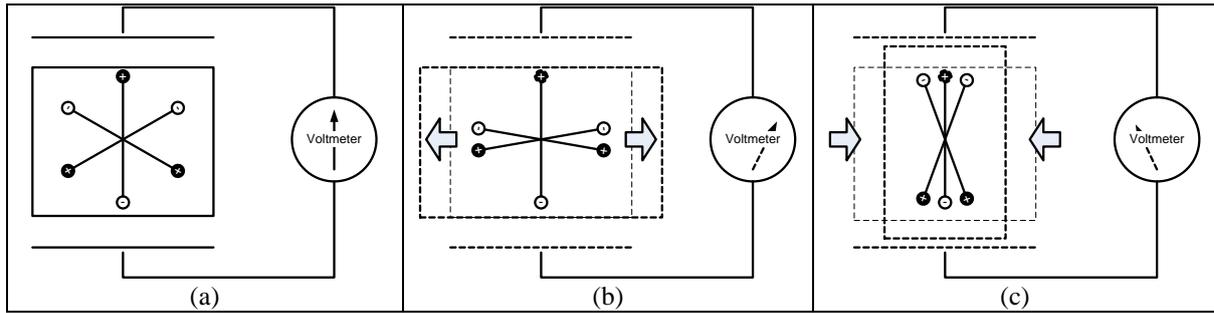
Gambar 1. Sistem karpet piezoelektrik untuk pemanenan energi

PERANCANGAN SISTEM KARPET PIEZOELEKTRIK

Mekanisme Pembentukan Tegangan Listrik pada Bahan Piezoelektrik

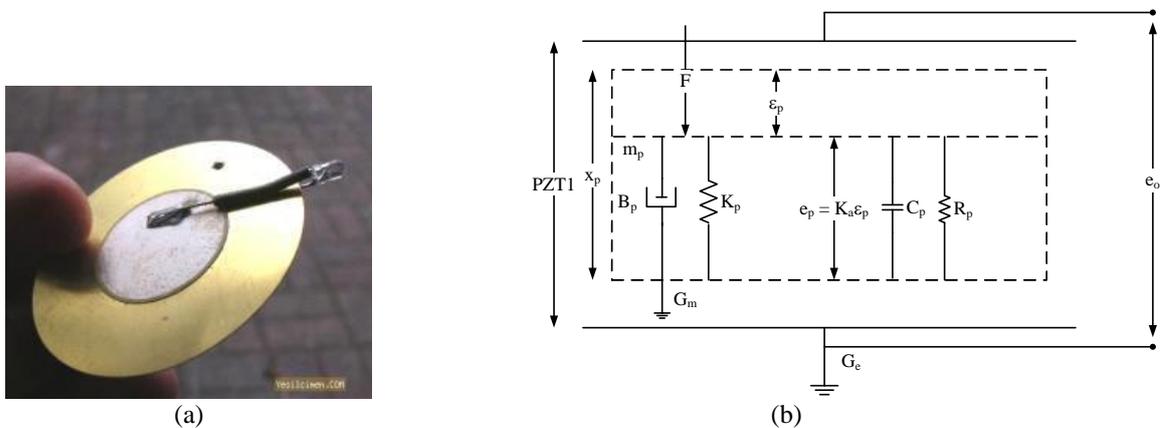
Bahan piezoelektrik merupakan kristal yang mampu menghasilkan tegangan listrik saat mengalami tekanan, tarikan atau getaran (*direct piezoelectric*). Kondisi sebaliknya juga berlaku, yaitu bila diberi tegangan listrik, kristal piezoelektrik bergetar (*inverse piezoelectric*) [4].

Kristal piezoelektrik menghasilkan tegangan listrik ketika terjadi perubahan polaritas muatan listrik akibat perubahan dimensinya. Gambar 2.a. memperlihatkan susunan muatan positif dan negatif yang tersebar merata bila kristal piezoelektrik tidak menerima pengaruh gaya luar. Namun bila menerima gaya tekan atau gaya tarik, posisi muatan berubah sehingga menghasilkan polarisasi muatan dan tegangan listrik. Gambar 2.b. memperlihatkan saat piezoelektrik menerima gaya tarik sehingga memendek dan melebar. Muatan positif dan negatif tertarik ke bagian samping dan saling menetralkan sehingga terbentuk kutub negatif dan kutub positif di bagian atas dan bawah. Gambar 2.c. memperlihatkan saat piezoelektrik menerima gaya tekan sehingga memanjang dan menyempit. Muatan terbagi pada dua sisi. Masing-masing sisi mengalami kelebihan muatan sehingga terbentuk kutub positif dan kutub negatif. Kutub-kutub ini menimbulkan perbedaan potensial listrik. Perbedaan potensial ini berlangsung sesaat (*impuls*) dan segera kembali ke keadaan netral. Bila kedua kutub bahan piezoelektrik dihubungkan dalam rangkaian listrik tertutup, perbedaan potensial yang terjadi dapat disalurkan dalam bentuk impuls arus listrik. Apabila kedua kutub ini tidak dihubungkan dengan rangkaian listrik, maka muatan piezoelektrik akan kembali pada posisi netral dengan sendirinya [4].



Gambar 2. Perubahan distribusi muatan bahan piezoelektrik
(a) Tanpa gaya luar, (b) Bila diberi gaya tarik, (c) Bila diberi gaya tekan

Untuk keperluan praktis, kristal piezoelektrik dapat ditemui di pasaran dalam berbagai bentuk. Pada penelitian ini digunakan keping piezoelektrik audio yang biasa digunakan sebagai komponen mikropon atau penguat suara, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.a. Mekanisme pembangkitan energi listrik pada keping ini ditunjukkan pada Gambar 3.b.



Gambar 3. (a) Bentuk keping piezoelektrik (b) Skema pembangkitan tegangan listrik pada keping piezoelektrik PZT1

Tinjau sebuah keping piezoelektrik PZT1 dengan massa m_p dan ketebalan x_p pada Gambar 3.b. Anggap pergerakan keping ini ditahan secara mekanik oleh alas G_m . PZT1 tersebut juga mempunyai redaman mekanik B_p dan konstanta elastisitas K_p . Sehingga, bila menerima tekanan F , PZT1 akan mengalami penipisan sebesar ϵ_p .

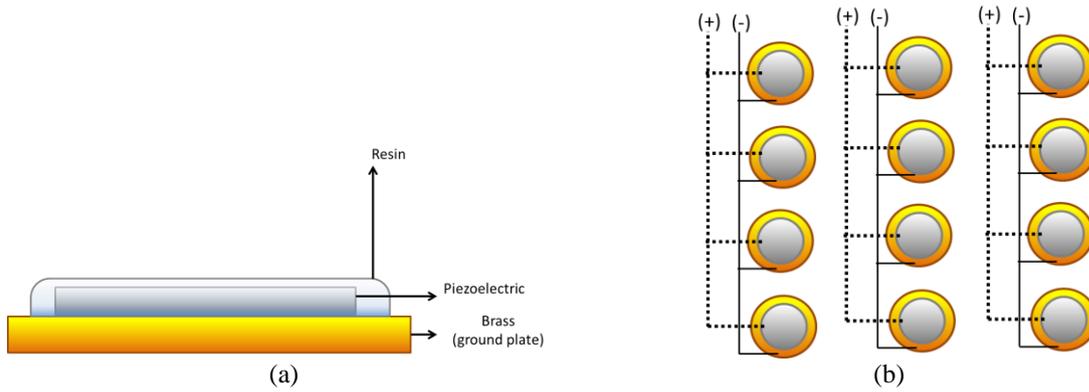
Selanjutnya, PZT1 akan menghasilkan tegangan awal e_p sebesar $K_a \epsilon_p$. Dengan memperhitungkan kapasitansi internal C_p dan resistansi internal R_p pada PZT1, maka dihasilkan fungsi transfer dalam domain Laplace yang menghubungkan tegangan listrik e_o dengan tekanan F sebagai berikut [1]:

$$\frac{e_o}{F} = \frac{K_a R_p s}{(R_p C_p s + 1)(m_p s^2 + B_p s + K_p)} \tag{1}$$

Fungsi transfer (1) menunjukkan bahwa setiap gaya yang diberikan kepada PZT1 akan menghasilkan impuls tegangan e_o . Kondisi ini juga menggambarkan sifat polarisasi tegangan sesaat yang telah diuraikan pada Gambar 2. Karena itu, untuk menghasilkan deret impuls tegangan e_o , keping tersebut perlu menerima gaya F yang berubah-ubah. Salah satu contoh penerapannya adalah bila PZT1 menerima tekanan yang berubah akibat ada orang yang melompat-lompat di atasnya. Hal ini memunculkan tantangan untuk menjaga ketahanan PZT1 menerima benturan yang berulang-ulang.

Pelapisan dan Perangkaian Keping Piezoelektrik

Untuk mencegah kerusakan dini akibat benturan yang berulang, maka setiap PZT1 pada penelitian ini dilapisi dengan resin bening, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.a.

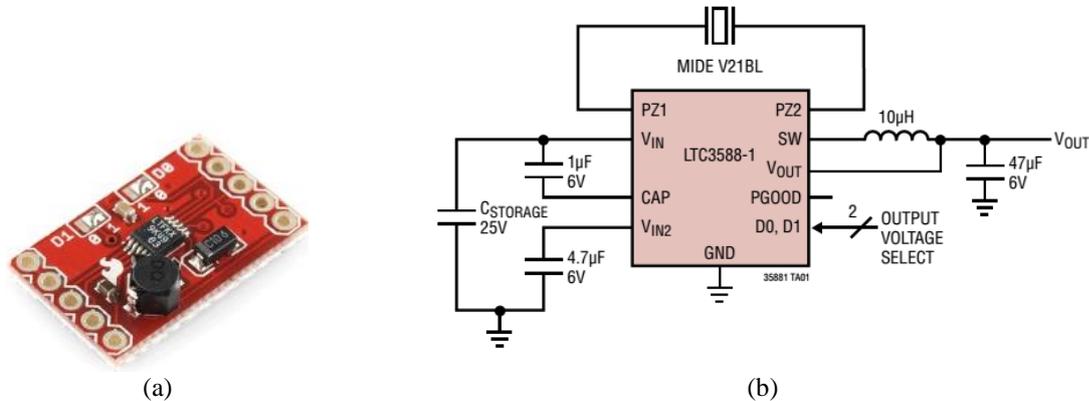


Gambar 4. (a) Pelapisan keping piezoelektrik dengan resin (b) Rangkaian paralel keping piezoelektrik

Keping-keping PZT1 selanjutnya disusun dalam bentuk matriks berukuran 16 x 10 keping. Untuk memaksimalkan akumulasi arus listrik, maka setiap PZT1 dihubungkan satu sama lain secara paralel. Hubungan paralel ini juga memudahkan deteksi dan penggantian keping yang rusak [6].

Modul Konverter LTC 3588-1

Berhubung sinyal listrik yang dihasilkan dari PZT1 adalah deret sinyal impuls, dibutuhkan konverter untuk mengubahnya menjadi sinyal DC sehingga didapatkan aliran muatan yang kontinu dan dapat disimpan ke dalam kapasitor. Pada penelitian ini digunakan modul penyearah dan penguat yang skemanya ditampilkan pada Gambar 5. LTC3588-1 dioperasikan dengan menghubungkan seluruh kutub-kutub PZT1 pada kanal PZ1 dan PZ2. IC ini menggunakan sistem *Under Voltage Lock Out* (UVLO) untuk menampung muatan listrik pada kapasitor $C_{storage}$. Hal ini berlangsung selama tegangan pada $C_{storage}$ masih lebih rendah dari tegangan keluaran V_{out} yang nilainya ditentukan pada kanal D_0 dan D_1 sesuai Tabel 1. Apabila tegangan pada $C_{storage}$ telah melebihi tegangan V_{out} , maka muatan listrik yang tertampung di $C_{storage}$ disalurkan ke kapasitor eksternal C_1 100 μ F yang dihubungkan pada kanal V_{out} [5].



Gambar 5. (a) Modul penyearah dan penguat (b) Skema modul

Tabel 1. Konfigurasi D_1 dan D_0 untuk pemilihan tegangan output

D_1	D_0	V_{OUT}	I_{VOUT}
0	0	1.8V	44nA
0	1	2.5V	62nA
1	0	3.3V	81nA
1	1	3.6V	89nA

Kapasitor Eksternal

Sebuah kapasitor terdiri dari dua lempengan elektroda yang dipisahkan oleh bahan dielektrik. Kapasitor memiliki fungsi sama dengan baterai, yaitu sebagai penyimpan energi. Perbedaannya adalah baterai membutuhkan waktu pengisian yang lebih lama dibandingkan dengan kapasitor. Banyaknya muatan Q yang dapat disimpan dalam sebuah kapasitor diindikasikan oleh kapasitansi C dan beda potensial listrik V yang terukur pada kanal-kanal kapasitor tersebut, sesuai persamaan (2):

$$CV = Q \tag{2}$$

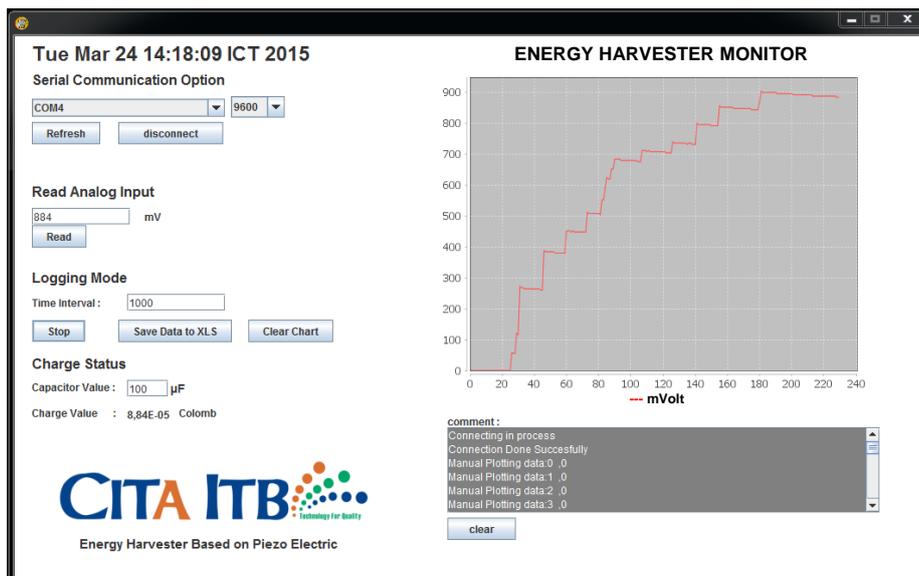
Pada penelitian ini, pengisian kapasitor eksternal untuk menampung muatan listrik yang dihasilkan oleh sistem karpet piezoelektrik dilakukan dengan menyambungkan kapasitor C_1 dengan tegangan keluaran konverter V_{out} dan hambatan R_1 . Tegangan pada kapasitor C_1 akan berubah eksponensial sebagai berikut [1]:

$$V_{C1}(t) = V_o(1 - e^{-t/R_1C_1}) \tag{3}$$

Energi yang disimpan dalam kapasitor bersifat sementara dan dapat dikosongkan dengan menghubungkan kapasitor pada resistor beban.

Sistem Akuisisi Data dan Antar Muka

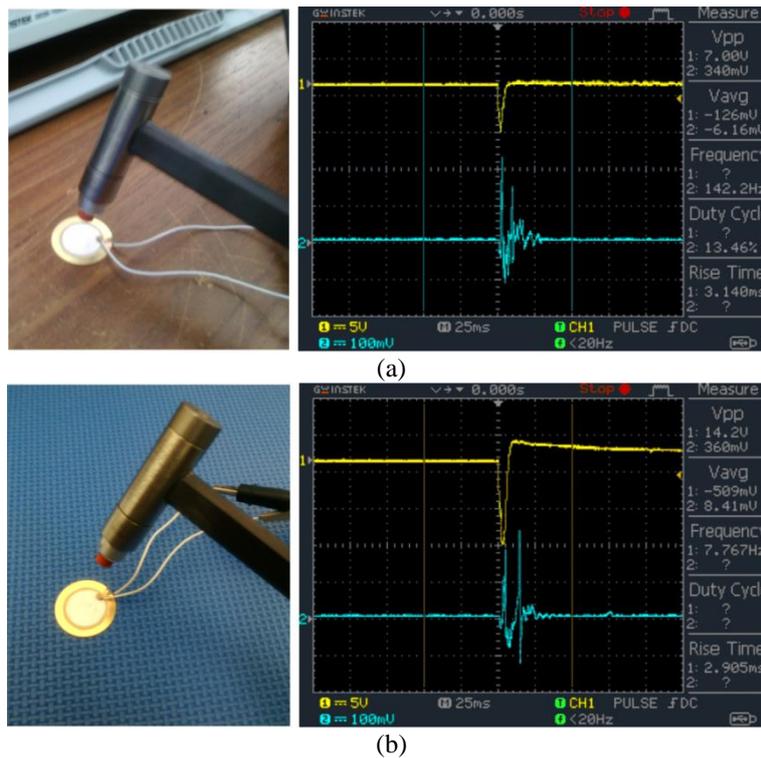
Untuk memantau dan merekam besarnya tegangan dan muatan yang terakumulasi pada kapasitor C_1 , pada penelitian ini digunakan sistem akuisisi data dan aplikasi antar muka (*Human Machine Interface*, HMI). Sistem akuisisi data ini terdiri dari modul mikroprosesor Arduino Mega 2560 yang membaca tegangan pada kapasitor C_1 melalui konverter analog – digital (Analog to Digital Converter, ADC). Mikroprosesor selanjutnya mengirim tegangan terukur yang telah dikonversi menjadi data digital ini melalui protokol komunikasi data serial RS232 menuju program aplikasi antarmuka pada komputer. Antarmuka ini diprogram menggunakan bahasa pemrograman Java, dengan kemampuan menampilkan data dalam bentuk numerik dan grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Antar muka pemantauan akumulasi tegangan dan muatan listrik pada kapasitor C_1

PENGUJIAN DAN ANALISIS KINERJA SISTEM

Sistem karpet piezoelektrik ini diuji pada dua aspek. Aspek pertama adalah kinerja PZT1 pada bahan alas yang berbeda. Aspek kedua adalah laju pengisian dan pengosongan kapasitor eksternal. Kedua jenis pengujian diuraikan pada subbab berikut.



Gambar 7. Pengujian tegangan keluaran PZT1 pada (a) alas kayu, dan (b) alas karet

Tegangan Keluaran Piezoelektrik pada Bahan Karpet yang Berbeda

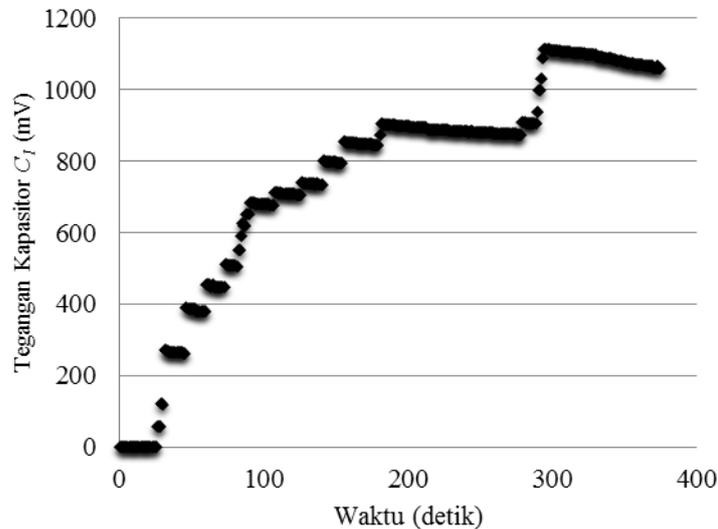
Pengujian ini dilaksanakan dengan memukul PZT1 yang telah dilapis resin dan diletakkan pada dua jenis alas. Alas yang pertama adalah alas kayu, dan yang kedua adalah alas karet. Untuk memukul PZT1, digunakan *impact hammer* PCB086C03. Perangkat ini menghasilkan tegangan sebesar 2.25 mV untuk setiap 1N gaya yang diberikannya terhadap suatu obyek. Tegangan listrik yang dihasilkan oleh *impact hammer* pada saat membentur PZT1, serta tegangan listrik yang dihasilkan oleh PZT1 direkam pada osiloskop digital GW Instep GDS1052-U. Grafik kedua pengujian ditunjukkan pada Gambar 7.a dan Gambar 7.b. Pada masing-masing gambar, grafik pada bagian bawah (biru) menunjukkan tegangan yang setara dengan gaya yang dihasilkan *impact hammer*, sedangkan grafik pada bagian atas (kuning) menunjukkan tegangan yang dihasilkan PZT1. Gaya yang diberikan *impact hammer*, tegangan keluaran PZT1 dan nilai konversi pembangkitan listrik masing-masing pengujian ditunjukkan pada Tabel 2. Tabel ini menunjukkan konversi pembangkitan listrik yang hampir dua kali lebih tinggi bila PZT1 diletakkan pada alas karet. Hal ini disebabkan oleh alas karet yang lebih elastis dari alas kayu, sehingga menghasilkan perubahan dimensi PZT1 yang lebih besar. Hasil pengujian ini mendukung pemilihan alas karet untuk karpet piezoelektrik.

Tabel 2. Pengaruh alas pada efisiensi pembangkitan energi

Jenis Alas	Gaya tekan <i>impact hammer</i>	Tegangan keluaran PZT1	Efisiensi
Kayu	$340 \text{ mV} / 2.25 \text{ mV} = 151.1\text{N}$	7 V	$7\text{V} / 151.1 \text{ N} = 0.046 \text{ V/N}$
Karet	$360\text{mV} / 2.25\text{mV} = 160\text{N}$	14.2 V	$14.2\text{V} / 160\text{N} = 0.088 \text{ V/N}$

Pengujian Pengisian Kapasitor Eksternal C_I

Pengujian pengisian kapasitor eksternal C_I dilaksanakan dengan cara melakukan aktivitas jalan dan lompat di atas karpet. Tegangan listrik yang dihasilkan disearahkan dan diakumulasi oleh LTC3588-1 dan diisikan ke kapasitor eksternal C_I . Perubahan tegangan pada kapasitor eksternal V_{CI} diamati melalui program antarmuka pengguna dan grafik datanya ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik V_{CI} akibat aktivitas lompat di atas karpet piezoelektrik selama 5 menit.

Gambar 8 menunjukkan bahwa tegangan V_{CI} yang dihasilkan dari aktivitas lompat di atas karpet piezoelektrik dapat mencapai 1.1 V. Energi U yang dihasilkan adalah :

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \times 100 \times 10^{-6} \text{ Farad} \times 1.1V^2 = 60.5 \times 10^{-6} \text{ Joule} \tag{4}$$

Pengujian Pengosongan Kapasitor Eksternal C_I

Pengujian pengosongan kapasitor dilaksanakan dengan cara meletakkan karpet di area yang banyak dilalui manusia. Kapasitor dibiarkan terisi sampai tegangan V_{CI} mencapai 580 mV. Kemudian, karpet piezoelektrik disimpan agar tidak mengalami tekanan, dan proses pengosongan kapasitor diamati menggunakan program antar muka. Grafik data yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 9.

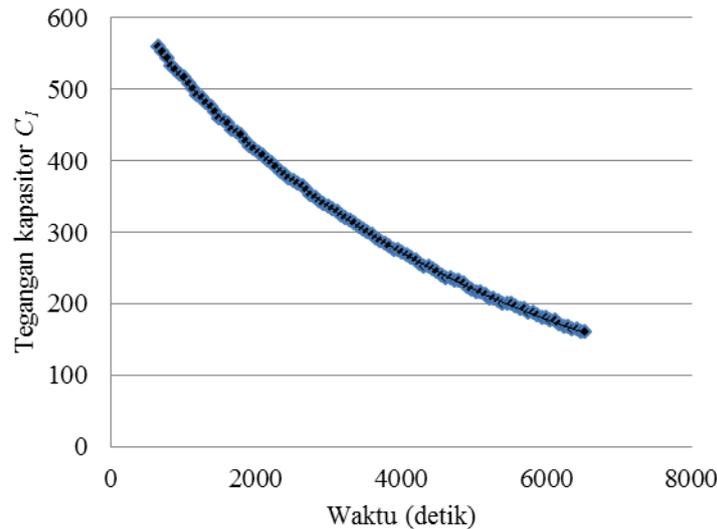
Mengacu pada persamaan discharge kapasitor berikut [1]:

$$V_C = V_o e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{4}$$

maka teknik regresi eksponensial digunakan untuk mendapatkan nilai parameter V_o dan τ yang menghasilkan kurva dengan jumlah kuadrat kesalahan terkecil terhadap data pengosongan kapasitor. Prosedur ini menghasilkan

$$V_C = 635.73e^{-\frac{t}{4717}} \tag{5}$$

Dengan demikian, konstanta waktu pengosongan kapasitor adalah 4717 detik, atau 78.61 menit. Konstanta waktu menyatakan lamanya penurunan dari tegangan awal hingga mencapai 37% nilai semula. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitor dapat menyimpan muatan listrik dalam waktu relatif lama. Hal ini juga menunjukkan potensi kapasitor tersebut untuk mengumpulkan energi listrik cukup baik.



Gambar 9. Pengosongan kapasitor C_1

KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan sebuah sistem karpet piezoelektrik untuk memanen energi dari aktivitas jalan dan lompat di atasnya. Karpet menggunakan alas karet yang menghasilkan defleksi dan tegangan keluaran yang lebih besar dibandingkan dengan menggunakan alas kayu. Untuk mencegah kerusakan akibat benturan yang berulang, setiap keping piezoelektrik yang digunakan dilapisi resin. Arus listrik yang dihasilkan karpet disearahkan dan dikuatkan menggunakan modul LTC3588-1, kemudian disalurkan ke kapasitor eksternal.

Besarnya tegangan kapasitor eksternal pada pengujian aktivitas jalan dan lompat selama 5 menit adalah 1.1 V. Ini setara dengan energi sebesar 60.5 μ Joule. Kapasitor eksternal yang digunakan untuk menampung energi ini mampu menampung muatan listrik dengan konstanta waktu pengosongan 78.61 menit. Spesifikasi ini menunjukkan potensi penggunaan sistem karpet piezoelektrik untuk memanen energi listrik dari aktivitas jalan dan lompat manusia di atas permukaan karpet.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Institut Teknologi Bandung yang telah mendanai penelitian ini melalui Program Pengabdian Kepada Masyarakat Institut Teknologi Bandung 2014.

REFERENSI

1. Doebelin, Ernest O., Measurement systems application and design, 4th Ed., New York, McGraw-Hill, 1990.
2. Fajrin, A. M., Sofyna, C. M., dan Ekawati, E., "Desain sistem pengujian karakteristik piezoelektrik dan pengembangannya sebagai modul pemanen energi", Seminar Nasional Integrasi Proses (SNIP) 2014, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, 27 November 2014
3. Guyomar, D. *et.al.*, "Energy harvesting from ambient vibrations and heat", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures OnlineFirst*, Vol. 00—2008
4. Heywang, Walter, Karl Lubitz, dan Wolfram Wersing, eds. *Piezoelectricity: evolution and future of a technology*. Vol. 114. Springer Science & Business Media, 2008.
5. Linear Technology, LTC3588-1 Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply, Datasheet,
6. Sodano, H. A., Inman, D.J. dan Park, G., "Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 16.10 (2005): 799-807.