

Desain Sepatu Berpiezoelektrik Sebagai Sistem Pemanen Energi dari Aktivitas Berjalan Manusia

^{1,2}Reza Raditya Pratama, ^{1,2}Muhammad Faizal Sofyan & ^{1,2}Estiyanti Ekawati

¹Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri,
Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung, Indonesia

²Pusat Teknologi Instrumentasi dan Otomasi, Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung, Indonesia

rezaraditya39@gmail.com, m.faizalsofyan@gmail.com, esti@instrument.itb.ac.id

Abstrak

Sepatu berpiezoelektrik merupakan salah satu teknologi yang dikembangkan untuk memanfaatkan potensi aktivitas berjalan manusia sebagai sumber energi terbarukan. Sistem sepatu berpiezoelektrik pada studi ini terdiri dari integrasi antara konfigurasi piezoelektrik dengan konverter yang diletakkan di dalam sol sepatu. Studi ini telah melalui beberapa tahap desain dan tahap uji untuk memperoleh sistem yang tepat untuk memanen energi dari aktivitas berjalan manusia. Pada penelitian ini, diseleksi delapan desain konfigurasi piezoelektrik, dengan variasi tipe piezoelektrik, jenis dan ketebalan material *insole*, jenis konverter dan jenis kapasitor penyimpanan muatan listrik. Pemilihan desain dilaksanakan melalui beberapa tahap uji. Tahap uji tersebut meliputi uji langkah kaki, uji menggunakan *impact hammer*, dan uji konverter. Sistem terpilih berdasarkan tiga tahap uji tersebut terdiri dari konfigurasi piezoelektrik K7520BP2 dengan 3mm Eva-foam Angin sebagai *insole*, dan konverter MB39C811. Tegangan terukur pada kapasitor 10mF yaitu 1,65Volt ketika diberi masukan berfrekuensi 2Hz selama 20 menit sehingga total muatan listrik tersimpan yaitu 16,5mC.

Kata Kunci: sepatu berpiezoelektrik; sumber energi terbarukan; aktivitas berjalan manusia.

1 Pendahuluan

Dewasa ini, energi listrik merupakan kebutuhan pokok manusia untuk dapat melaksanakan aktivitas sehari-hari. Hal tersebut menyebabkan peningkatan konsumsi listrik setiap tahun. Di Indonesia, konsumsi listrik per kapita pada tahun 2011 mencapai 679,70kWh. Konsumsi listrik yang terus meningkat ini harus diimbangi dengan ketersediaan sumber energi listrik baru dan terbarukan.

Aktivitas manusia sehari-hari berpotensi menghasilkan daya yang dapat digunakan sebagai sumber energi. Contohnya adalah aktivitas berjalan [1]. Fakta itu memicu penelitian mengenai bahan piezoelektrik sebagai modul pemanen energi yang memanfaatkan aktivitas manusia. Salah satunya adalah Zhao dan You [2], yang mengembangkan sepatu berpiezoelektrik untuk

menghasilkan energi listrik dari aktivitas berjalan manusia. Studi tersebut mengembangkan dua purwarupa sol sepatu berpiezoelektrik. Purwarupa pertama terbuat dari *multilayer* PVDF film dan struktur plastik yang dirancang untuk diletakkan di bawah tumit, sedangkan purwarupa kedua dirancang sebagai *insole* yang terbuat dari *flexible silicone rubber* dan dua *multilayer* PVDF film. Lebih banyak energi listrik yang dapat dihasilkan oleh purwarupa pertama, sedangkan purwarupa kedua lebih nyaman digunakan.

Paper ini melaporkan penelitian yang mengadaptasi pendekatan Zhou dan You [2] pada desain sol sepatu berpiezoelektrik yang terdiri dari konfigurasi piezoelektrik dan konverter yang dirancang untuk diletakkan pada bagian *midsole* di dalam sol sepatu, sehingga lebih nyaman dikenakan. Penelitian ini juga menggunakan bahan piezoelektrik PZT yang lebih ekonomis dibandingkan dengan PVDF. Namun untuk mengatasi sifat bahan PZT yang lebih rapuh, diperlukan konfigurasi material yang mampu melindungi bahan PZT agar bertahan lama.

Pada penelitian ini, dilakukan seleksi terhadap delapan buah desain sol, dengan pilihan variasi tipe piezoelektrik PZT (K7520BP2 dan audio generik), jenis dan ketebalan material penyusun sol (Eva-foam Angin dan Eva-foam Keras), jenis konverter (MB39C811 dan LTC3588-1), serta jenis kapasitor sebagai media penyimpanan (kapasitansi 0,1mF, 1mF, dan 10mF). Pemilihan desain dilaksanakan melalui beberapa tahap uji. Tahap uji tersebut meliputi uji langkah kaki, uji pukul menggunakan *impact hammer*, dan uji efisiensi konverter.

2 Metode Perancangan

Umumnya, piezoelektrik bermaterial PVDF lebih sering diaplikasikan untuk memanfaatkan potensi aktivitas berjalan manusia pada sepatu berpiezoelektrik karena fleksibilitasnya, tetapi piezoelektrik yang digunakan pada studi ini yaitu piezoelektrik berbahan PZT karena lebih mudah

didapatkan. Piezoelektrik berbahan PZT lebih kaku dan lebih mudah patah, sehingga diperlukan konfigurasi untuk mengatasi sifat tersebut tetapi tetap mampu memanfaatkan potensi aktivitas berjalan manusia sebagai sumber energi terbarukan.

Konfigurasi yang dirancang pada studi ini, adalah konfigurasi piezoelektrik yang diletakkan pada bagian *midsole* di dalam sol sepatu. Konfigurasi tersebut dilengkapi dengan *push button* pada bagian atas piezoelektrik sehingga tekanan ketika pengguna berjalan lebih terpusat pada bagian tengah piezoelektrik. *Push button* yang digunakan pada konfigurasi piezoelektrik terbuat dari material *insole* yang merupakan salah satu material penyusun struktur sol sepatu.

Terdapat dua tipe piezoelektrik yang diseleksi untuk digunakan, yaitu piezoelektrik pemanen energi K7520BP2 dan piezoelektrik audio generik. Terdapat pula beberapa jenis material yang diseleksi untuk digunakan sebagai material penyusun struktur sol sepatu, seperti pada Tabel 1. Pengaruh ketebalan material penyusun bagian *insole* akan diuji untuk menentukan konfigurasi piezoelektrik terbaik dan yang paling tepat untuk memanen energi dari aktivitas berjalan manusia.

Konfigurasi piezoelektrik terbaik ditentukan melalui uji langkah kaki dan uji menggunakan *impact hammer*. Setelah konfigurasi piezoelektrik telah ditentukan, sistem sepatu berpiezoelektrik yang mengintegrasikan konfigurasi piezoelektrik terbaik dengan konverter diuji performanya melalui uji konverter. Sistem berkinerja terbaik dipilih sebagai sistem yang paling tepat untuk memanfaatkan potensi aktivitas berjalan manusia sebagai sumber energi terbarukan pada penelitian ini.

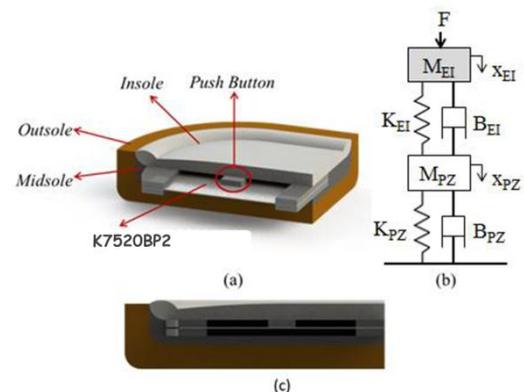
2.1 Konfigurasi Piezoelektrik

Pada studi ini, dua tipe piezoelektrik (K7520BP2 dan audio generik) dan dua jenis material penyusun *insole* dengan ketebalan yang divariasikan merupakan materi penyusun konfigurasi piezoelektrik di dalam sol sepatu. Desain konfigurasi piezoelektrik dengan dua tipe piezoelektrik yang berbeda disesuaikan dengan tipe piezoelektrik tersebut, sedangkan desain struktur sol ditetapkan berdasarkan struktur sol sepatu konvensional yang terdiri dari tiga lapisan sol sepatu, yaitu *insole*, *midsole*, dan *outsole*.

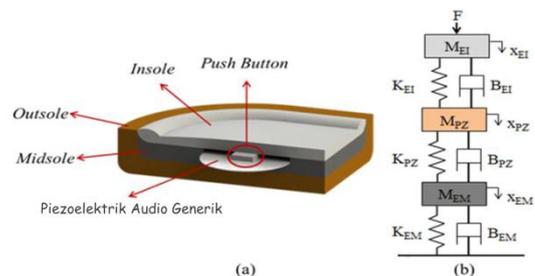
Konfigurasi piezoelektrik diletakkan pada bagian tumit sepatu berpiezoelektrik untuk memperoleh gaya maksimal dari aktivitas berjalan manusia [3]. Setiap konfigurasi piezoelektrik dilengkapi dengan *push button* berukuran 1mm x 1mm x 3mm pada bagian atas piezoelektrik.

Tabel 1 Spesifikasi Struktur Sol Sepatu Berpiezoelektrik

Struktur Sol	Jenis Sol	Ketebalan
<i>Insole</i>	Eva-foam Angin atau Eva-foam Keras	3mm atau 6mm
<i>Midsole</i>	Eva-foam Keras	10mm
<i>Outsole</i>	Sol Karet	12mm



Gambar 1 (a) Susunan Bahan Konfigurasi K7520BP2 (b) Skema Konfigurasi K7520BP2 (c) Tampak Samping Konfigurasi K7520BP2



Gambar 2 (a) Konfigurasi Bahan Konfigurasi Piezoelektrik Audio Generik (b) Skema Konfigurasi Piezoelektrik Audio Generik

Masing-masing konfigurasi diilustrasikan oleh Gambar 1 (konfigurasi K7520BP2) dan Gambar 2 (konfigurasi audio generik). Pada konfigurasi K7520BP2, piezoelektrik K7520BP2 dijepit dengan akrilik pada kedua ujungnya serta ditambahkan ruang kosong di bawah piezoelektrik K7520BP2 untuk memaksimalkan defleksi pada piezoelektrik.

Pada konfigurasi piezoelektrik audio generik, tidak terdapat ruang kosong di bawah piezoelektrik karena piezoelektrik tipe ini membutuhkan bantalan untuk membantunya kembali ke posisi semula setelah terdefleksi.

Skema konfigurasi piezoelektrik pada Gambar 1 (b) dan Gambar 2 (b) menunjukkan penambahan massa *insole* (M_{EI}) akan mengurangi efek dari gaya yang diberikan manusia ketika berjalan. Elastisitas material *insole* juga akan memengaruhi defleksi pada piezoelektrik. Defleksi pada piezoelektrik berkurang ketika nilai konstanta pegas material *insole* (K_{EI}) semakin besar.

Kontribusi parameter-parameter yang terlibat pada proses terdefleksinya piezoelektrik oleh persamaan 1 (konfigurasi K7520BP2) dan persamaan 2 (konfigurasi audio generik) yang didasarkan pada pemodelan piezoelektrik sebagai akselerometer [4]. Arti parameter yang ditampilkan pada persamaan 1 dan persamaan 2 dapat diikuti pada nomenklatur.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{EI} \\ \ddot{x}_{EI} \\ \ddot{x}_{PZ} \\ \ddot{x}_{PZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-K_{EI}}{M_{EI}} & \frac{-B_{EI}}{M_{EI}} & \frac{K_{EI}}{M_{EI}} & \frac{B_{EI}}{M_{EI}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_{EI}}{M_{PZ}} & \frac{B_{EI}}{M_{PZ}} & \frac{-K_{EI}-K_{PZ}}{M_{PZ}} & \frac{-B_{EI}-B_{PZ}}{M_{PZ}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{EI} \\ \dot{x}_{EI} \\ x_{PZ} \\ \dot{x}_{PZ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{EI} \\ \ddot{x}_{EI} \\ \ddot{x}_{PZ} \\ \ddot{x}_{PZ} \\ \ddot{x}_{EM} \\ \ddot{x}_{EM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_{EI}}{M_{EI}} & \frac{-B_{EI}}{M_{EI}} & \frac{K_{EI}}{M_{EI}} & \frac{B_{EI}}{M_{EI}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{EI}}{M_{PZ}} & \frac{B_{EI}}{M_{PZ}} & \frac{-K_{EI}-K_{PZ}}{M_{PZ}} & \frac{-B_{EI}-B_{PZ}}{M_{PZ}} & \frac{K_{PZ}}{M_{PZ}} & \frac{B_{PZ}}{M_{PZ}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{K_{PZ}}{M_{EM}} & \frac{B_{PZ}}{M_{EM}} & \frac{-K_{PZ}-K_{EM}}{M_{EM}} & \frac{-B_{PZ}-B_{EM}}{M_{EM}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{EI} \\ \dot{x}_{EI} \\ x_{PZ} \\ \dot{x}_{PZ} \\ x_{EM} \\ \dot{x}_{EM} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F \quad (2)$$

Terdapat delapan buah desain konfigurasi piezoelektrik dengan variasi pada jenis dan ketebalan *insole* yang ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2 Pilihan Desain Konfigurasi Piezoelektrik

Nomor Konfigurasi	Tipe Piezoelektrik	Jenis <i>Insole</i>	Tebal <i>Insole</i>
1	K7520BP2	Eva-foam Angin	3mm
2			6mm
3		Eva-foam Keras	3mm
4			6mm
5	Piezoelektrik Audio Generik	Eva-foam Angin	3mm
6			6mm
7		Eva-foam Keras	3mm
8			6mm

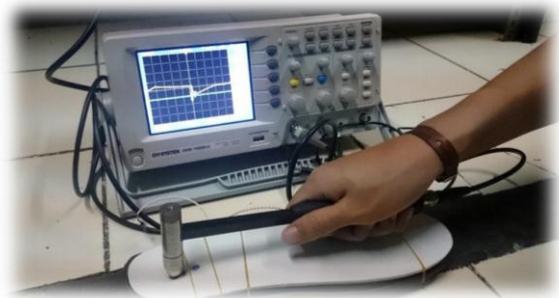
Konfigurasi piezoelektrik tersebut diseleksi melalui dua tahap uji untuk membuktikan hipotesis yang didasarkan pada persamaan 1 dan persamaan 2.

2.2 Pengujian

Pengujian diawali dengan uji langkah kaki yang bertujuan untuk mengetahui tegangan listrik yang dihasilkan oleh konfigurasi uji ketika diberikan gaya berupa pijakan kaki manusia dengan berat 65kg (Gambar 3). Konfigurasi piezoelektrik yang diletakkan pada bagian *midsole* di dalam sol sepatu dihubungkan pada osiloskop digital sehingga terukur tegangan keluaran konfigurasi piezoelektrik ketika penguji melangkahakan kakinya.



Gambar 3 Pelaksanaan Uji Langkah Kaki



Gambar 4 Pelaksanaan Uji Menggunakan *Impact Hammer*



Gambar 5 Pelaksanaan Uji Konverter

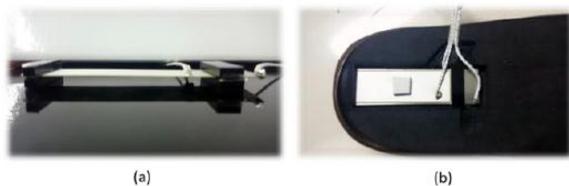
Pengujian tahap kedua adalah uji pukul menggunakan *impact hammer* yang bertujuan untuk mengukur tegangan listrik yang dihasilkan oleh konfigurasi uji ketika diberikan gaya oleh *impact hammer* (Gambar 4). Pada percobaan tahap kedua, baik konfigurasi uji maupun *impact*

hammer terhubung dengan osiloskop digital sehingga baik tegangan keluaran konfigurasi piezoelektrik maupun gaya yang diberikan oleh *impact hammer* dapat diukur. Gaya *impact hammer* diukur dengan cara mengalikan tegangan keluaran *impact hammer* ketika dipukulkan dengan nilai sensitivitas instrumen tersebut.

Pengujian tahap ketiga adalah uji konverter yang bertujuan untuk mengetahui besarnya tegangan listrik yang dihasilkan oleh kapasitor setelah menampung muatan listrik dari sistem sepatu berpiezoelektrik (Gambar 5). Sistem sepatu berpiezoelektrik merupakan integrasi dari konfigurasi piezoelektrik yang memiliki tegangan keluaran terbaik berdasarkan hasil uji menggunakan *impact hammer* dengan konverter. Pada pengujian ini, sistem sepatu berpiezoelektrik yang terhubung dengan kapasitor dipukul dengan frekuensi yang disesuaikan dengan langkah cepat manusia oleh *impact hammer* selama periode waktu tertentu. Pada waktu yang sama dengan pemberian gaya *impact hammer* pada sistem sepatu berpiezoelektrik, tegangan pada kapasitor diukur setiap 10 detik.

3 Hasil dan Diskusi

Realisasi masing-masing konfigurasi piezoelektrik ditunjukkan pada Gambar 6 (konfigurasi K7520BP2) dan Gambar 7 (konfigurasi audio generik).



Gambar 6 Realisasi Konfigurasi K7520BP2 (a) Konstruksi K7520BP2 (b) Konfigurasi K7520BP2 di dalam Sol



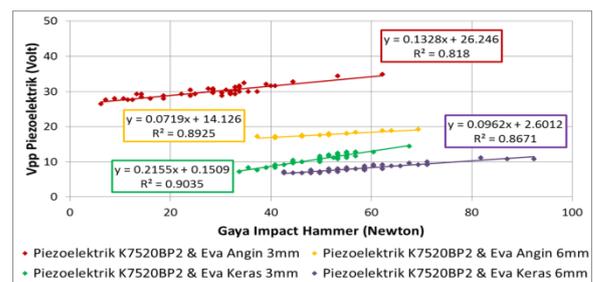
Gambar 7 Realisasi Konfigurasi Piezoelektrik Audio Generik (a) Tampak Atas (b) Tampak Samping

Berdasarkan data uji langkah kaki pada Tabel 3, penambahan ketebalan *insole*, yang sebanding dengan penambahan massa *insole* (M_{EI}), berpengaruh pada tegangan keluaran konfigurasi piezoelektrik. Konfigurasi piezoelektrik nomor 1 sampai 6 menunjukkan penambahan ketebalan

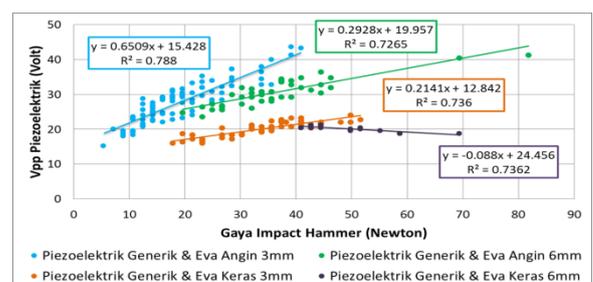
material *insole* mengurangi tegangan keluaran konfigurasi piezoelektrik, dengan perkecualian pada konfigurasi piezoelektrik audio generik dengan *insole* jenis Eva-foam Keras.

Tabel 3 Data Uji Langkah Kaki

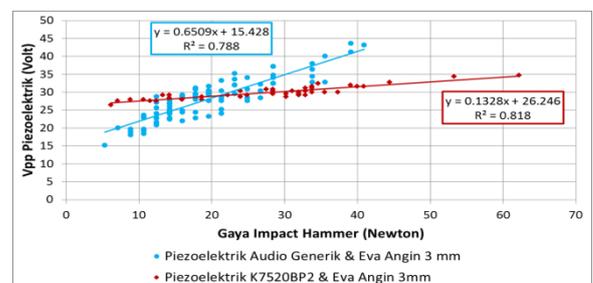
Nomor Konfigurasi	Tegangan Keluaran (Volt)		
	Min	Maks	Rata-rata
1	15,60	35,60	26,40
2	10,40	20,40	16,52
3	14,00	19,20	16,32
4	8,80	18,40	12,17
5	6,00	30,40	15,11
6	8,00	18,00	12,05
7	10,40	24,00	16,21
8	14,40	32,00	23,53



(a)



(b)



(c)

Gambar 8 Hasil Uji *Impact Hammer* (a) Tegangan Listrik Keluaran K7520BP2 (b) Tegangan Keluaran

Piezoelektrik Audio Generik (c) Perbandingan Tegangan Keluaran antar Dua Tipe Piezoelektrik

Berdasarkan uji *impact hammer*, penambahan ketebalan *insole* dan variasi jenis material *insole* berpengaruh terhadap tegangan keluaran konfigurasi piezoelektrik. Variasi jenis material *insole* menentukan parameter massa *insole* (M_{EI}) dan parameter konstanta pegas *insole* (K_{EI}). Nilai konstanta pegas material yang lebih besar mengindikasikan bahwa material yang digunakan lebih kaku. Gambar 8 (a) dan (b) menunjukkan tegangan listrik yang dihasilkan konfigurasi dengan *insole* Eva-foam Angin bernilai lebih besar dibandingkan tegangan listrik yang dihasilkan pada konfigurasi dengan *insole* Eva-foam Keras. Konfigurasi nomor 1 (piezoelektrik K7520BP2 dengan *insole* Eva-foam Angin dan ketebalan 3 mm) dan konfigurasi nomor 5 (piezoelektrik audio generik dengan *insole* berjenis Eva-foam Angin dan ketebalan 3 mm) menghasilkan tegangan listrik terbesar. Ketika tegangan keluaran konfigurasi piezoelektrik nomor 1 dan 5 dibandingkan (Gambar 8 (c)), tegangan listrik yang dihasilkan konfigurasi nomor 1 lebih konsisten pada rentang pemberian gaya *impact hammer*.

Pada pelaksanaan uji konverter, terdapat lima konfigurasi yang menggabungkan piezoelektrik, yang menghasilkan tegangan keluaran terbaik berdasarkan hasil uji *impact hammer*, dengan konverter sebagaimana ditunjukkan Tabel 4.

Tabel 4 Variasi Sistem Sepatu Berpiezoelektrik

Sistem Sepatu Berpiezoelektrik	Nomor Konfigurasi	Jenis Konverter
A	1	LTC 3588-1
B		MB39C811
C	5	LTC 3588-1
D		MB39C811
E	1*	MB39C811

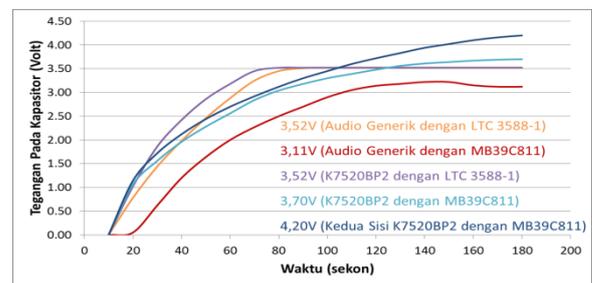
Sistem sepatu berpiezoelektrik E menggunakan konfigurasi piezoelektrik nomor 1 termodifikasi. Konfigurasi nomor 1 hanya memanfaatkan satu sisi piezoelektrik K7520BP2 sebagai masukan konverter MB39C811, sedangkan konfigurasi nomor 1 termodifikasi memanfaatkan kedua sisi piezoelektrik K7520BP2 sebagai masukan untuk konverter MB39C811.

Setiap sistem menghasilkan tegangan terukur berbeda pada kapasitor 0,1mF setelah 180 detik. Berdasarkan Gambar 9 (a), tegangan terukur pada kapasitor 0,1mF terbesar didapatkan dari sistem sepatu berpiezoelektrik E sehingga sistem tersebut ditetapkan sebagai sistem sepatu berpiezoelektrik

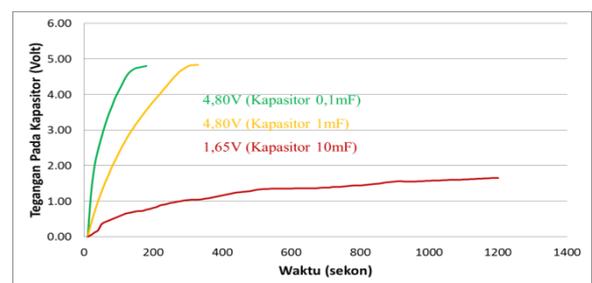
berperforma terbaik yang paling tepat untuk memanen energi dari aktivitas berjalan manusia.

Performa sistem sepatu berpiezoelektrik terpilih kemudian diuji dengan cara dihubungkan dengan kapasitor yang nilai kapasitansinya divariasikan. Pengujian ini menghasilkan tegangan terukur pada kapasitor 0,1mF sebesar 4,80Volt setelah 180 detik; tegangan terukur pada kapasitor 1mF mencapai 4,80Volt setelah 300 detik; dan tegangan terukur pada kapasitor 10mF mencapai 1,65Volt setelah 20 menit. Hal tersebut konsisten dengan prinsip kerja kapasitor, yaitu kapasitor berkapasitansi besar membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai tegangan terukur tertentu ketika dibandingkan dengan kapasitor berkapasitansi lebih kecil.

Karena itu, sistem sepatu berpiezoelektrik yang dipilih yaitu sistem dengan kapasitor berkapasitansi 10mF karena kapasitor berkapasitansi besar mampu menyimpan muatan lebih besar. Sistem sepatu berpiezoelektrik tersebut mampu menyimpan muatan listrik sebesar 16,5mC ketika mendapat masukan berfrekuensi 2Hz selama 20 menit yang setara dengan 2400 langkah kaki manusia.



(a)



(b)

Gambar 9 Hasil Uji Konverter (a) Tegangan Terukur Pada Kapasitor 0,1mF untuk Setiap Sistem (b) Tegangan Terukur Pada Kapasitor Ketika Mendapat Tegangan Masukan dari Konfigurasi Piezoelektrik K7520BP2 yang Memanfaatkan Kedua Sisinya Sebagai Masukan untuk Konverter MB39C811 dengan Insole Berjenis Eva-foam Angin dan Tebal 3mm.

4 Kesimpulan

Sistem sepatu berpiezoelektrik yang terdiri dari integrasi konfigurasi piezoelektrik K7520BP2, yang memanfaatkan kedua sisinya sebagai masukan untuk konverter MB39C811 dengan *insole* berjenis Eva-foam Angin dan tebal 3mm telah didesain pada studi ini. Sistem tersebut dipilih sebagai sistem berperforma terbaik serta yang paling tepat untuk memanen energi dari aktivitas berjalan manusia karena kemampuannya untuk menyimpan muatan listrik sebesar 16,5mC pada kapasitor 10mF ketika mendapat masukan berfrekuensi 2Hz selama 20 menit yang setara dengan 2400 langkah kaki manusia.

5 Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Program Kreativitas Mahasiswa 2015 Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi yang telah membantu pendanaan penelitian ini.

6 Nomenklatur

B_{EI}	=	konstanta redaman <i>insole</i>
B_{EM}	=	konstanta redaman <i>midsole</i>
B_{PZ}	=	konstanta redaman piezoelektrik
F	=	Gaya
K_{EI}	=	konstanta pegas <i>insole</i>
K_{EM}	=	konstanta pegas <i>midsole</i>
K_{PZ}	=	konstanta pegas piezoelektrik

M_{EI}	=	massa <i>insole</i>
M_{EM}	=	massa <i>midsole</i>
M_{PZ}	=	massa piezoelektrik
X_{EI}	=	defleksi pada <i>insole</i>
X_{EM}	=	defleksi pada <i>midsole</i>
X_{PZ}	=	defleksi pada piezoelektrik
\dot{X}_{EI}	=	diferensiasi defleksi pada <i>insole</i> terhadap waktu
\dot{X}_{EM}	=	diferensiasi defleksi pada <i>midsole</i> terhadap waktu
\dot{X}_{PZ}	=	diferensiasi defleksi pada piezoelektrik terhadap waktu
\ddot{X}_{EI}	=	diferensiasi \dot{X}_{EI} terhadap waktu
\ddot{X}_{EM}	=	diferensiasi \dot{X}_{EM} terhadap waktu
\ddot{X}_{PZ}	=	diferensiasi \dot{X}_{PZ} terhadap waktu

7 Daftar Pustaka

- [1] T. Starner, "Human-powered wearable computing," IBM Syst. J., vol. 35, no. 3.4, pp. 618-629, 1996.
- [2] J. Zhao and Z. You, "A shoe-embedded piezoelectric energy harvester for wearable sensors," Sensors, vol. 14, no. 7, pp. 12497-12510, 2014. (references)
- [3] D. Lieberman, M. Venkadesan, A. I. Daoud, and W. A. Werbel, "Biomechanics of Foot Strikes and Applications to Running Barefoot or in Minimal Footwear," Harv. Univ., 2010., in press.
- [4] K. Ogata and Y. Yang, Modern Control Engineering 5th Edition, Prentice Hall, 2010.