



Perancangan *Prototype* Lantai *Piezoelectric* sebagai Penghasil Energi Listrik

Ferro Aji¹, Yuthi Ar Razi², Anisa Fadilah³, Roni Hajianto⁴, Hernawan Novianto⁵

^{1,2,3,4,5}Prodi Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas

E-mail: Ferro.aji@gmail.com

Abstract

The increasing demand for electricity has driven the development of environmentally friendly and sustainable alternative energy sources. Piezoelectric technology offers an innovative solution by converting mechanical energy, such as human foot pressure, into electrical energy. However, most previous studies have focused only on individual material testing, not the integration of a functional floor system with optimal circuit configuration. This study aims to design and test a small-scale piezoelectric floor prototype capable of harvesting energy from pedestrian activity. The prototype utilizes PZT ceramic sensors (27 mm) and was tested using parallel and series circuit configurations. The results show that the prototype can generate an actual voltage of 83.65 V (parallel) and 174.7 V (series) from a total of 5000 footsteps over five months. Although the actual voltage is lower than the ideal due to energy losses and pressure inconsistencies, the system remains functional for low-power applications such as LED lighting or IoT sensors. These findings demonstrate the potential of implementing piezoelectric floor systems in public areas as an efficient, eco-friendly, small-scale renewable energy solution that supports smart building concepts.

Keywords: piezoelectric, renewable energy, floor prototype, energy conversion, footstep, energy harvesting.

Abstrak

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat mendorong pengembangan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Teknologi *piezoelectric* menawarkan solusi inovatif melalui konversi energi mekanik menjadi energi listrik, seperti tekanan dari langkah kaki manusia. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada pengujian material *piezoelectric* secara individu, belum pada integrasi sistem lantai dalam skala aplikasi nyata dengan konfigurasi rangkaian optimal. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji *prototype* lantai *piezoelectric* skala kecil yang mampu memanen energi dari aktivitas pejalan kaki. *Prototype* ini menggunakan sensor keramik PZT (27 mm) dan diuji dengan konfigurasi rangkaian paralel dan seri. Hasil menunjukkan *prototype* mampu menghasilkan tegangan aktual sebesar 83,65 V (paralel) dan 174,7 V (seri) dari total 5000 pijakan selama lima bulan. Meskipun tegangan aktual lebih rendah dibanding nilai ideal akibat kerugian energi dan inkonsistensi tekanan, sistem tetap fungsional untuk aplikasi berdaya rendah seperti penerangan LED atau sensor IoT. Hasil ini membuktikan potensi implementasi sistem lantai *piezoelectric* di area publik sebagai solusi energi terbarukan skala kecil yang efisien, ramah lingkungan, dan mendukung konsep *smart building*.

Kata kunci: *piezoelectric*, energi terbarukan, *prototype* lantai, konversi energi, injakan kaki, *harvesting* energi.

1. Pendahuluan

Kebutuhan akan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan teknologi [1]. Di sisi lain, ketergantungan yang tinggi terhadap sumber energi fosil menimbulkan berbagai permasalahan, seperti pencemaran lingkungan, perubahan iklim, serta keterbatasan pasokan energi tak terbarukan di masa depan [2]. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi alternatif yang ramah

lingkungan dan berkelanjutan menjadi kebutuhan yang mendesak [3]. Salah satu solusi inovatif yang muncul adalah pemanfaatan energi mekanik dari aktivitas manusia yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal [4][5]. Teknologi *piezoelectric* menjadi salah satu alternatif yang menarik dalam konteks ini [6][7]. *Piezoelectric* adalah material yang mampu menghasilkan listrik saat

dikenai tekanan atau getaran mekanis [8]. Fenomena ini dapat dimanfaatkan untuk mengubah energi dari langkah kaki manusia di permukaan lantai menjadi energi listrik yang berguna [1] [3].

Dalam proyek ini, dirancang sebuah *prototype* lantai *piezoelectric* skala kecil yang terdiri dari sensor *piezoelectric* tipe ceramic PZT, dirangkai dalam konfigurasi seri dan paralel, serta dilapisi dengan alas pelindung berbahan *rubber sheet* untuk menstabilkan tekanan mekanis [7][9]. Tegangan yang dihasilkan akan disalurkan melalui rangkaian penyearah (*rectifier*), dan diuji daya listriknya untuk keperluan ringan seperti lampu LED atau sensor IoT [10][11]. Rangkaian alat ini dirancang dengan memperhatikan kemudahan fabrikasi dan biaya rendah, sehingga memungkinkan untuk diadopsi dalam area publik dengan lalu lintas pejalan kaki tinggi seperti gedung perkuliahan [3][6].

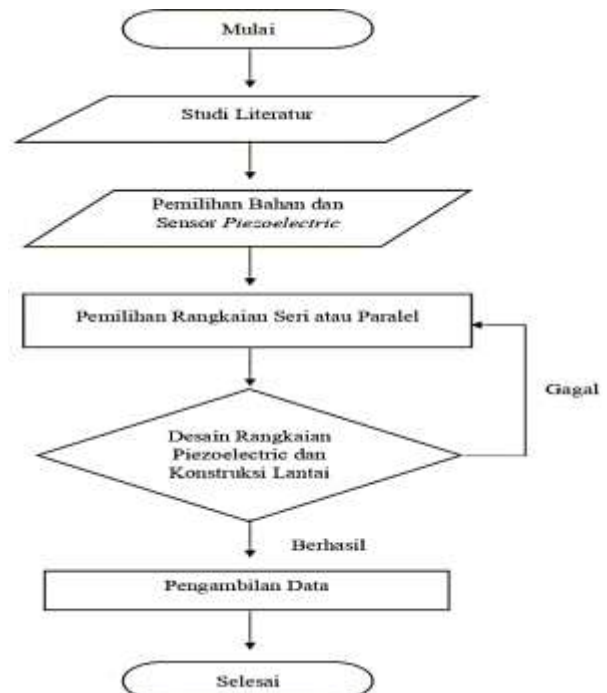
Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada pengujian material *piezoelectric* secara individu, belum pada integrasi sistem lantai dalam skala aplikasi nyata dengan konfigurasi rangkaian optimal. Untuk itulah, penelitian ini bertujuan merancang dan menguji *prototype* lantai *piezoelectric* skala kecil yang mampu memanen energi dari aktivitas pejalan kaki. *Prototype* ini menggunakan sensor keramik PZT (27 mm) dan diuji dengan konfigurasi rangkaian paralel dan seri. Hasil menunjukkan *prototype* mampu menghasilkan tegangan aktual sebesar 83,65 V (paralel) dan 174,7 V (seri) dari total 5000 pijakan selama lima bulan. Meskipun tegangan aktual lebih rendah dibanding nilai ideal akibat kerugian energi dan inkonsistensi tekanan, sistem tetap fungsional untuk aplikasi berdaya rendah seperti penerangan LED atau sensor IoT.

Perancangan *prototype* ini bertujuan untuk mengimplementasikan konsep *energy harvesting* berbasis *piezoelectric* sebagai alternatif energi terbarukan skala kecil [1][5][8]. Dengan memanfaatkan gerakan alami manusia, sistem ini dapat membantu menyediakan energi listrik tambahan dengan efisiensi tinggi dan dampak lingkungan yang rendah [3][12][13].

2. Metode Penelitian

Penelitian pada komponen *piezoelectric* ini menggunakan pendekatan melalui studi literatur dan pengumpulan data melalui eksperimen di laboratorium kelistrikan [6][8][14]. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan pemahaman mendalam tentang perkembangan teknologi *piezoelectric*, termasuk efektivitas, efisiensi, dan karakteristiknya [2][9]. Pendekatan ini juga melibatkan elaborasi dan analisis data yang lebih detail pada komponen *piezoelectric* dan rangkaian yang terhubung dengannya [7][10]. Dalam melakukan pengumpulan data, dibuat diagram

alir proses penelitian dengan tahap-tahap sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 [11].



Gambar 1. Flowchart Metode Penelitian



Gambar 2. Penyusunan Piezoelectric



Gambar 3. Stuktur Alas Pijakan

Desain Proyek

Perancangan *prototype* lantai *piezoelectric* dilakukan dengan membuat unit sistem dan perlengkapan uji yang digunakan untuk menguji kelayakan perubahan tekanan mekanis menjadi energi listrik sesuai dengan prinsip kerja

piezoelectric [7][8][14]. Desain sistem meliputi penyusunan *piezoelectric*, struktur alas pijakan, serta konfigurasi rangkaian pengukuran listrik, dengan skematik sederhana untuk dimensi dan susunan komponen ditunjukkan pada Gambar 2, 3 dan 4 [5][9][10][11].



Gambar 4. Rangkaian Pengukuran Listrik

Tahapan Pelaksanaan

Dalam mewujudkan hasil dari pengujian *prototype* lantai *piezoelectric* sebagai penghasil energi listrik maka dibutuhkan tahapan – tahapan pelaksanaan sebagai berikut ini:

1. Studi Literatur dan Pengumpulan Data
2. Perancangan *Prototype*
3. Perakitan Sistem
4. Pengujian dan Pengambilan data
5. Analis Hasil
6. Evaluasi Penyusunan Laporan

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan:

- 1) *Solar Charge Controller* (PWM) 10A
Solar charge controller berfungsi untuk mengatur aliran arus dari panel surya ke baterai. PWM (*Pulse Width Modulation*) menjaga baterai dari *overcharging* (pengisian berlebih) dan *overdischarging* (pengosongan berlebih), membatasi arus maksimal hingga 10A, serta menjaga umur dan efisiensi kerja baterai.
- 2) *Power Monitor* Daya Digital
Power monitor daya digital berfungsi untuk mengukur dan menampilkan parameter listrik seperti tegangan (*volt*), arus (*ampere*), daya (*watt*), dan energi (*kWh*). Alat ini digunakan untuk memantau konsumsi energi perangkat dan menganalisis performa sistem kelistrikan secara *real-time*.
- 3) *MCB 1 Phase 25A*
MCB (Miniature Circuit Breaker) 1 phase 25A berfungsi sebagai pelindung rangkaian listrik dari gangguan arus lebih (*overcurrent*) dan hubung singkat (*short circuit*). Jika arus melebihi 25 A, MCB akan otomatis memutus aliran listrik untuk mencegah kerusakan perangkat dan bahaya kebakaran.

4) *Power Inverter* 220W

Power inverter 220W berfungsi untuk mengubah arus searah (DC) dari sumber seperti baterai atau panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) sebesar 220V. Alat ini digunakan untuk mengoperasikan peralatan elektronik yang menggunakan listrik AC dengan daya maksimal 220 watt.

5) *Boost Converter*

Boost converter berfungsi untuk menaikkan tegangan DC dari level rendah ke level lebih tinggi. Misalnya, dari 5 V menjadi 12 V. Alat ini sangat berguna dalam sistem elektronik portabel yang memerlukan tegangan output lebih tinggi daripada sumber dayanya.

6) Solder

Solder berfungsi untuk menyambungkan komponen elektronik ke papan sirkuit (PCB) menggunakan logam timah. Alat ini melelehkan timah agar dapat merekatkan kaki komponen ke jalur tembaga pada PCB, dan umum digunakan dalam perakitan, perbaikan, atau modifikasi perangkat elektronik.

Bahant yang digunakan:

Sensor Piezoelectric (27 mm)

Sensor *piezoelectric* berfungsi untuk mengubah tekanan mekanik atau getaran menjadi energi listrik [7][8][14]. Dalam sistem energi pijakan, sensor ini mendeteksi tekanan saat diinjak dan menghasilkan arus listrik kecil yang dapat diolah lebih lanjut melalui rangkaian penyearah dan penyimpan energi [1][5][10].

Kabel Engkel

Kabel engkel berfungsi sebagai penghantar arus listrik antar komponen, memastikan distribusi daya berjalan dengan baik dalam sistem *piezoelectric* [6][10]. Kabel ini digunakan untuk menghubungkan sensor, rangkaian, dan komponen lain dengan konduktivitas yang baik serta pemasangan yang sederhana [2][9].

Triplek Ukuran 20 x 20

Triplek berfungsi sebagai media atau alas pijakan tempat pemasangan sensor *piezoelectric*, yang berperan penting dalam menyalurkan tekanan mekanik ke permukaan sensor secara efisien [7][9]. Ukuran 20 × 20 cm memberikan area yang cukup untuk diinjak dan membantu mendistribusikan tekanan ke sensor secara merata, sehingga meningkatkan kestabilan dan efisiensi konversi energi [1][13].

Op Amp

Op Amp berfungsi untuk memperkuat sinyal listrik yang dihasilkan oleh sensor *piezoelectric*, sehingga

dapat meningkatkan sensitivitas sistem terhadap tekanan mekanik [2][10]. Karena output sensor piezoelectric sangat kecil, Op Amp dibutuhkan agar sinyal cukup kuat untuk diproses atau disimpan dalam baterai maupun modul penyimpanan energi [5][11].

Rubber Sheet

Rubber sheet berfungsi sebagai pelindung dan peredam tekanan di bagian atas sensor piezoelectric, membantu menjaga integritas fisik sensor dari tekanan berlebih atau benturan langsung [6][9]. Selain melindungi sensor dari kerusakan mekanis, bahan karet juga membantu mendistribusikan beban secara merata dan meningkatkan kenyamanan pijakan pada permukaan lantai piezoelectric [7][13].

Rectifier Diode Bridge MB6S

Rectifier Diode Bridge MB6S berfungsi untuk mengubah arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan oleh sensor piezoelectric menjadi arus searah (DC) yang dapat disimpan dalam baterai [2][10]. Komponen ini merupakan bagian penting dalam proses penyearahan arus, karena menentukan efisiensi konversi energi dari sinyal piezoelectric menjadi daya listrik yang stabil [5][10].

Baterai

Baterai berfungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan dari sensor piezoelectric setelah melalui rangkaian penyearah dan penguat. Energi ini kemudian dapat digunakan untuk menyalakan perangkat kecil atau lampu indikator, terutama pada sistem berdaya rendah seperti penerangan LED atau sensor IoT [4].

Panel Box

Panel box berfungsi sebagai tempat untuk merakit dan melindungi seluruh rangkaian elektronik dari kerusakan luar, seperti debu, air, atau benturan [6][9]. Panel ini juga membantu merapikan susunan komponen agar lebih aman, efisien, dan mudah diakses dalam proses pengujian maupun perawatan sistem piezoelectric .

Timah Solder

Timah solder berfungsi untuk menyambungkan kaki-kaki komponen elektronik dengan jalur pada PCB atau kabel. Timah ini meleleh saat dipanaskan dan mengeras saat dingin, menciptakan sambungan listrik yang kuat, permanen, dan memastikan kontinuitas arus dalam sistem rangkaian piezoelectric [2][11].

Isolasi Listrik

Isolasi listrik berfungsi untuk melindungi sambungan kabel atau komponen terbuka dari hubungan pendek (*short circuit*) serta mencegah sentuhan langsung yang dapat menyebabkan sengatan listrik. Selain itu, bahan ini juga menjaga kerapian dan keamanan rangkaian, terutama pada sistem kelistrikan bertegangan rendah seperti prototipe lantai *piezoelectric*

Alat Keselamatan / Safety

Alat keselamatan/ *safety* yang digunakan:

1. Alas Tahan Panas (*Heat-resistant Mat*)
Alat tahan panas berfungsi sebagai permukaan kerja yang aman saat menyolder, melindungi meja kerja dari kerusakan panas dan juga mencegah kebakaran kecil akibat tetesan timah panas [6][10].
2. Alat Pemadam Api Ringan (APAR)
APAR berfungsi sebagai alat pengaman darurat jika terjadi korsleting atau kebakaran kecil selama pengujian prototype. Perangkat ini sangat penting disediakan di area kerja listrik dan elektronik untuk mencegah kerusakan peralatan serta menjaga keselamatan pengguna [6][9][10].

3. Hasil dan Pembahasan

Pada 1 keping *piezoelectric* melalui persamaannya diperoleh sebagai berikut:

1. Gaya total:
 $F = 60 \text{ kgf} = 588,40 \text{ N}$
2. Gaya per petak *piezoelectric*
 $F_{\text{per petak}} = \frac{F}{1} = 588,40 \text{ N}$
3. Gaya per keping *piezoelectric* (jika ada 4 keping per petak):
 $F_{\text{per keping}} = \frac{F}{4} = \frac{588,40}{4} = 147,1 \text{ N}$
4. Tegangan yang dihasilkan per keping *piezoelectric*:
 $u_{\text{per keping}} = \frac{d_{33} \times F}{e_{33} \times A} = \frac{98 \text{ pC/N} \times 0,22 \text{ mm} \times 147,1 \text{ N}}{23,3 \text{ pC/N} \times 27 \text{ mm}} = 5,04 \text{ V}$
5. Tegangan maksimum per petak *piezoelectric* (dari 4 keping):
 $u_{\text{fmax per petak}} = 5,04 \text{ V} \times 4 = 20,16 \text{ V}$

Melalui persamaan diatas selanjutnya akan dihitung gaya per-petak *piezoelectric*, gaya per-keping *piezoelectric*, voltase per-keping *piezoelectric*, serta voltase maksimal per-petak *piezoelectric*. Sebagai sampel diambil data berat badan mahasiswa teknik mesin kilang tingkat tiga, sehingga diperoleh data seperti yang tertera pada Tabel 1 selama dua bulan.

Tabel 1. Data Gaya, Voltase, dan u_{fmax} Mahasiswa TMK Tingkat 3

No	Nama	Berat Badan (Kg)	Gaya (N)	Gaya (F)/Petak Piezoelectric (N)	Gaya (F)/Keping Piezoelectric (N)	voltase (u)/keping k Piezoelectric (V)	ufmax/Petak Piezoelectric (V)
1.	Nabal	66,6	653,12289	653,12289	163,2807225	7,42303078	29,69212312
2.	Dika	55	539,36575	539,36575	134,8414375	6,130130524	24,5205221
3.	Enrico	78	764,9187	764,9187	191,229675	8,693639652	34,77455861
4.	Afif	72	706,0788	706,0788	176,5197	8,02489814	32,09959256
5.	Danu	65	637,43225	637,43225	159,3580625	7,24469971	28,97879884

6.	Nando	65	637,43225	637,43225	159,3580625	7,24469971	28,97879884
7.	Andi	62	608,0123	608,0123	152,003075	6,910328954	27,64131582
8.	Imel	50	490,3325	490,3325	122,583125	5,572845931	22,29138372
9.	Kenzy	77	755,11205	755,11205	188,7780125	8,582182733	34,32873093
10.	Sultan	60	588,399	588,399	147,09975	6,687415117	26,74966047
11.	haryanto	90	882,5985	882,5985	220,649625	10,03112268	40,1244907
12.	Sule	74	725,6921	725,6921	181,423025	8,247811977	32,99124791
13.	Slamet	60	588,399	588,399	147,09975	6,687415117	26,74966047
14.	Dipta	64	627,6256	627,6256	156,9064	7,133242791	28,53297117
15.	Rifqy	69	676,65885	676,65885	169,1647125	7,690527384	30,76210954
16.	Panji	67	657,04555	657,04555	164,2613875	7,467613547	29,87045419
17.	Gilang	58	568,7857	568,7857	142,196425	6,46450128	25,85800512
18.	Danis	65	637,43225	637,43225	159,3580625	7,24469971	28,97879884
19.	Arin	50	490,3325	490,3325	122,583125	5,572845931	22,29138372
20.	Rifandi	65	637,43225	637,43225	159,3580625	7,24469971	28,97879884
21.	Anisa	50	490,3325	490,3325	122,583125	5,572845931	22,29138372
22.	Irza	56,5	554,075725	554,075725	138,5189313	6,297315902	25,18926361
23.	Yuthi	60	588,399	588,399	147,09975	6,687415117	26,74966047
24.	Bagas	67	657,04555	657,04555	164,2613875	7,467613547	29,87045419
25.	Tito	74	725,6921	725,6921	181,423025	8,247811977	32,99124791

Berdasarkan data perhitungan Tabel 1 diperoleh ufm_{ax} per petak *piezoelectric* yang berbeda-beda dari setiap mahasiswa tergantung pada berat badan mahasiswa itu sendiri.

Tabel 2. Data Injakan Lantai *Piezoelectric*

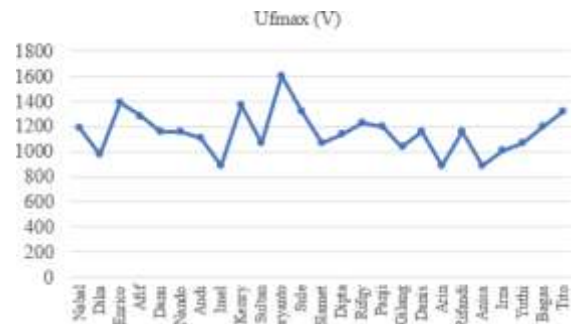
Kelas	Jumlah Mahasi swa	Jumlah Hari Perkuliahan (permin gg)	Jumlah Injakan Lantai <i>Piezoelectric</i> Mahasiswa Teknik Mesin Kilang Berdasarkan Kehadiran Bulan Maret dan April 2025							
			Maret				April			
S202	25	5	1	2	3	4	1	2	3	4
			250	250	250	250	250	250	250	250
Total			2000				Injakan			

Berdasarkan Tabel 2, jumlah injakan yang dihasilkan mahasiswa Teknik Mesin Kilang tingkat tiga selama dua bulan adalah 2000 injakan, yang diperoleh dari penjumlahan injakan pada bulan Maret hingga April [12]. Jumlah injakan per minggu diperoleh dari hasil perkalian antara jumlah mahasiswa dengan jumlah hari perkuliahan per bulan, kemudian dikalikan dua karena aktivitas pulang dan pergi, yang mencerminkan simulasi nyata pemanfaatan energi pijakan manusia dalam sistem *piezoelectric floor* [1][13].

Tabel 3. Total ufm_{ax} ideal Mahasiswa TMK Tingkat Tiga Selama Dua Bulan

No	Nama	Ufm _{ax} (V)
1.	Nabal	1187,685
2.	Dika	980,8209
3.	Enrico	1390,982
4.	Afif	1283,984
5.	Danu	1159,152
6.	Nando	1159,152
7.	Andi	1105,653
8.	Imel	891,6553
9.	Kenzy	1373,149
10.	Sultan	1069,986
11.	haryanto	1604,980
12.	Sule	1319,650

No	Nama	Ufm _{ax} (V)
13.	Slamet	1069,986
14.	Dipta	1141,319
15.	Rifqy	1230,484
16.	Panji	1194,818
17.	Gilang	1034,320
18.	Danis	1159,152
19.	Arin	891,6553
20.	Rifandi	1159,152
21.	Anisa	891,6553
22.	Irza	1007,571
23.	Yuthi	1069,986
24.	Bagas	1194,818
25.	Tito	1319,650
Total		28891,42



Gambar 5. Grafik Ufm_{ax}

Berdasarkan data Tabel 3, nilai ufm_{ax} ideal per mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Kilang tingkat tiga selama periode dua bulan telah berhasil dihitung. Nilai ini menunjukkan kapasitas maksimum energi listrik yang dapat dihasilkan atau diserap oleh masing-masing mahasiswa dalam konteks studi atau percobaan yang dilakukan.

Apabila nilai ufm_{ax} tiap mahasiswa dijumlahkan secara keseluruhan, maka diperoleh total kumulatif sebesar 28.891,42 volt untuk seluruh mahasiswa tingkat tiga di Program Studi Teknik Mesin Kilang. Nilai total ini memberikan gambaran mengenai kapasitas kolektif mahasiswa dalam menghasilkan atau menyalurkan energi listrik maksimum, serta dapat digunakan sebagai acuan untuk evaluasi performa kelompok, perencanaan distribusi beban, atau pengembangan prototipe lebih lanjut yang melibatkan partisipasi mahasiswa dalam pengukuran dan aplikasi praktis energi listrik.

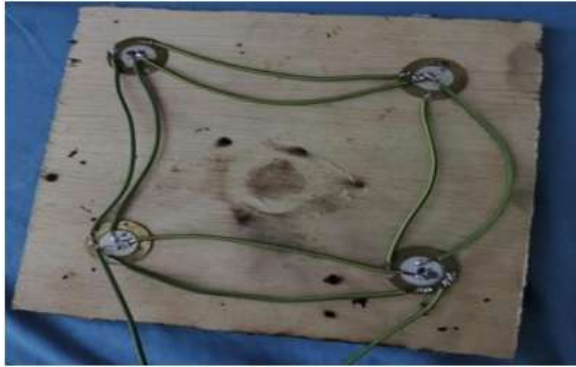
Selain itu, angka total ini juga dapat menjadi indikator dasar untuk membandingkan performa antarangkatan atau untuk analisis efisiensi penggunaan energi dalam kegiatan praktikum atau eksperimen teknik mesin kilang.

Hasil Pengujian Prototype Lantai *Piezoelectric*

Rangkaian Paralel

Rangkaian paralel *prototype* lantai *piezoelectric* seperti Gambar 6 ini dapat digunakan untuk membandingkan jumlah tegangan yang dihasilkan

lebih besar atau lebih kecil dibandingkan dengan rangkaian seri. Pada prinsipnya metode pengujian dengan rangkaian paralel menghasilkan tegangan yang lebih kecil dibandingkan dengan rangkaian seri namun menghasilkan arus yang lebih besar dibandingkan dengan rangkaian seri. Pada Uji rangkaian paralel mendapatkan hasil yang tampak pada Gambar 7.



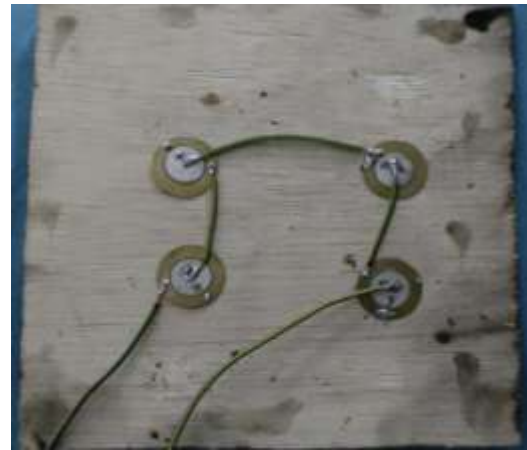
Gambar 6. Prototipe Lantai Piezoelektrik dengan Konfigurasi Rangkaian Paralel



Gambar 7. Voltase Prototype Lantai Piezoelectric Rangkaian Paralel

Rangkaian Seri

Rangkaian seri prototype lantai piezoelectric seperti Gambar 8 ini dapat digunakan untuk membandingkan jumlah tegangan yang dihasilkan lebih besar atau lebih kecil dibandingkan dengan rangkaian paralel. Pada prinsipnya metode pengujian dengan rangkaian seri menghasilkan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan rangkaian paralel namun menghasilkan arus yang lebih kecil dibandingkan dengan rangkaian paralel. Pada uji rangkaian seri mendapatkan hasil yang tampak pada Gambar 9.



Gambar 8 . Prototipe Lantai Piezoelectric Rangkaian Seri



Gambar 9. Voltase Prototype lantai Piezoelectric Rangkaian Seri

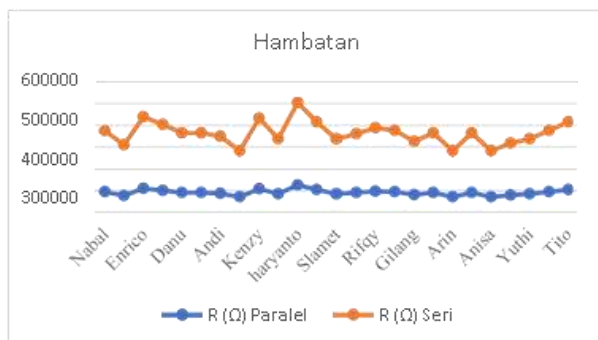


Gambar 10. Arus Prototype lantai Piezoelectric Rangkaian Seri

Dari hasil di atas dapat dilakukan perhitungan untuk mengetahui daya (Tabel 4) dan hambatan (Gambar 11) pada rangkaian sebagai berikut:

Tabel 4. Arus

No	Nama	Berat Badan (kg)	Voltage/ keping (V)	Arus (A)	
				Paralel	Seri
1.	Nabal	66,6	7,42303078	0,00008	0,00002
2.	Dika	55	6,130130524	0,00008	0,00002
3.	Enrico	78	8,693639652	0,00008	0,00002
4.	Afif	72	8,02489814	0,00008	0,00002
5.	Danu	65	7,24469971	0,00008	0,00002
6.	Nando	65	7,24469971	0,00008	0,00002
7.	Andi	62	6,910328954	0,00008	0,00002
8.	Imel	50	5,572845931	0,00008	0,00002
9.	Kenzy	77	8,582182733	0,00008	0,00002
10.	Sultan	60	6,687415117	0,00008	0,00002
11.	haryanto	90	10,03112268	0,00008	0,00002
12.	Sule	74	8,247811977	0,00008	0,00002
13.	Slamet	60	6,687415117	0,00008	0,00002
14.	Dipta	64	7,133242791	0,00008	0,00002
15.	Rifqy	69	7,690527384	0,00008	0,00002
16.	Panji	67	7,467613547	0,00008	0,00002
17.	Gilang	58	6,46450128	0,00008	0,00002
18.	Danis	65	7,24469971	0,00008	0,00002
19.	Arin	50	5,572845931	0,00008	0,00002
20.	Rifandi	65	7,24469971	0,00008	0,00002
21.	Anisa	50	5,572845931	0,00008	0,00002
22.	Irza	56,5	6,297315902	0,00008	0,00002
23.	Yuthi	60	6,687415117	0,00008	0,00002
24.	Bagas	67	7,467613547	0,00008	0,00002
25.	Tito	74	8,247811977	0,00008	0,00002



Gambar 11. Grafik Hambatan

Berdasarkan pengambilan data secara langsung didapatkan u_{fmax} aktual per-mahasiswa sebagaimana tercantum pada Tabel 5.

Tabel 5. Voltase aktual Maksimal Per-Petak Piezoelectric

No	Nama	Berat Badan (Kgf)	u_{fmax} /Petak Piezoelectric (V)	
			Paralel	Seri
1.	Nabal	66,6	3,416	7,118
2.	Dika	55	2,82	5,878
3.	Enrico	78	4	8,338
4.	Afif	72	3,69	7,695
5.	Danu	65	3,332	6,947

6.	Nando	65	3,12	6,9
7.	Andi	62	3,177	6,621
8.	Imel	50	2,577	5,416
9.	Kenzy	77	3,95	8,285
10.	Sultan	60	3,055	6,402
11.	haryanto	90	4,614	9,619
12.	Sule	74	3,8	7,909
13.	Slamet	60	3,069	6,413
14.	Dipta	64	3,28	6,84
15.	Rifqy	69	3,541	7,475
16.	Panji	67	3,438	7,268
17.	Gilang	58	2,973	6,199
18.	Danis	65	2,82	5,878
19.	Arin	50	2,615	5,447
20.	Rifandi	65	3,403	6,98
21.	Anisa	50	2,564	5,344
22.	Irza	56,5	2,9	6,043
23.	Yuthi	60	3,076	6,413
24.	Bagas	67	3,429	7,255
25.	Tito	74	3,801	7,91
Total u_{fmax}			82,46	172,59

Tabel 6. Total u_{fmax} aktual Mahasiswa TMK Tingkat Tiga Selama Dua Bulan

No	Nama	U_{fmax} selama dua bulan (V)	
		Paralel	Seri
1.	Nabal	136,64	284,72
2.	Dika	112,8	235,12
3.	Enrico	160	333,52
4.	Afif	147,6	307,8
5.	Danu	133,28	277,88
6.	Nando	124,8	276
7.	Andi	127,08	264,84
8.	Imel	103,08	216,64
9.	Kenzy	158	331,4
10.	Sultan	122,2	256,08
11.	haryanto	184,56	384,76
12.	Sule	152	316,36
13.	Slamet	122,76	256,52
14.	Dipta	131,2	273,6
15.	Rifqy	141,64	299
16.	Panji	137,52	290,72
17.	Gilang	118,92	247,96
18.	Danis	112,8	235,12
19.	Arin	104,6	217,88
20.	Rifandi	136,12	279,2
21.	Anisa	102,56	213,76
22.	Irza	116	241,72
23.	Yuthi	123,04	256,52
24.	Bagas	137,16	290,2
25.	Tito	152,04	316,4
Total		3.288,4	6.903,7

Pembahasan

Analisis Perbandingan data ideal dan aktual pada *prototype* lantai piezoelectric

Dalam pengujian *prototype* lantai *piezoelectric*, dilakukan pengukuran tegangan maksimum

(U_{fmax}) untuk dua konfigurasi sambungan paralel dan seri. Data diambil dari 25 responden dengan berat badan bervariasi. Hasil pengukuran menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan antara nilai ideal dan aktual. Tabel perbandingan data ideal dan aktual disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Tabel Perbandingan Data Ideal Dan Aktual

No.	Nama	Berat badan	Ufmax ideal (V)	Ufmax actual (V)	
				Paralel	Seri
1.	Nabal	66,6	1187,6849	136,64	284,72
2.	Dika	55	980,82088	112,8	235,12
3.	Enrico	78	1390,9823	160	333,52
4.	Afif	72	1283,9837	147,6	307,8
5.	Danu	65	1159,152	133,28	277,88
6.	Nando	65	1159,152	124,8	276
7.	Andi	62	1105,6526	127,08	264,84
8.	Imel	50	891,65535	103,08	216,64
9.	Kenzy	77	1373,1492	158	331,4
10.	Sultan	60	1069,9864	122,2	256,08
11.	haryanto	90	1604,9796	184,56	384,76
12.	Sule	74	1319,6499	152	316,36
13.	Slamet	60	1069,9864	122,76	256,52
14.	Dipta	64	1141,3188	131,2	273,6
15.	Rifqy	69	1230,4844	141,64	299
16.	Panji	67	1194,8182	137,52	290,72
17.	Gilang	58	1034,3202	118,92	247,96
18.	Danis	65	1159,152	112,8	235,12
19.	Arin	50	891,65535	104,6	217,88
20.	Rifandi	65	1159,152	136,12	279,2
21.	Anisa	50	891,65535	102,56	213,76
22.	Irza	56,5	1007,5705	116	241,72
23.	Yuthi	60	1069,9864	123,04	256,52
24.	Bagas	67	1194,8182	137,16	290,2
25.	Tito	74	1319,6499	152,04	316,4
Total u _{fmax}			28.891,4	3.298,4	6.903,7



Gambar 12. Perbandingan Ufmax ideal dan aktual

1. Data ini menunjukkan bahwa:

- Tegangan ideal jauh lebih tinggi, karena secara teoritis tegangan tiap elemen *piezoelectric* ditambahkan tanpa kehilangan.
- Tegangan aktual lebih rendah karena adanya faktor nyata yang mempengaruhi efisiensi sistem.

2. Validasi Keberhasilan Sistem

Meskipun nilai aktual lebih rendah, *prototype* lantai *piezoelectric* berhasil menghasilkan energi listrik nyata. Hal ini membuktikan bahwa konsep pemanfaatan energi mekanik dari injakan kaki untuk menghasilkan listrik adalah layak dan fungsional.

3. Pemanfaatan Energi Listrik yang Dihasilkan

Total tegangan aktual dalam sambungan seri adalah 6.903,7 volt. Energi ini dapat disimpan dalam baterai atau *supercapacitor* melalui system penyimpanan energi (*Energy Harvesting Circuit*) kemudian digunakan untuk kebutuhan daya rendah seperti menyalakan lampu LED di dalam kelas, mengisi daya sensor IoT, atau menyediakan daya darurat untuk alarm keamanan atau *indicator* digital

Penyebab Utama Perbedaan Tegangan Ideal dan Aktual

- Asumsi Perhitungan Ideal Tidak Realistis
Dalam teori, setiap *piezoelectric* diasumsikan bekerja pada kondisi optimal, tanpa mempertimbangkan faktor resistansi internal, rugi daya, serta ketidakaturan tekanan. Hal ini menyebabkan tegangan ideal terlalu tinggi dibandingkan hasil nyata.
- Kehilangan Energi dalam Rangkaian Nyata
Dalam konfigurasi nyata, energi dari *piezoelectric* mengalami penurunan akibat resistansi kabel dan konektor, efisiensi penyearah (dioda), dan beban *output* yang mempengaruhi kinerja *piezo*.
- Karakteristik Mekanis Pengguna
Setiap individu memiliki berat badan dan gaya injakan yang berbeda. Meskipun dalam teori tekanan proporsional terhadap berat badan, dalam kenyataan distribusi tekanan tidak selalu *linier* dan efisien terhadap sensor *piezo*.
- Efek Sambungan Paralel vs Seri

Dalam sambungan seri, tegangan ideal sangat tinggi karena tegangan tiap elemen dijumlahkan. Tapi kenyataannya, tegangan tidak bertambah secara sempurna karena perbedaan tekanan antar elemen dan kerugian *resistif*. Dalam sambungan paralel, arus bertambah tapi tegangan tidak, dan ini lebih mendekati hasil aktual yang relatif lebih stabil namun tetap lebih rendah dari ideal.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi rangkaian seri menghasilkan tegangan puncak 174,7 V) yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan konfigurasi paralel (83,65 V). Hal ini sejalan dengan prinsip dasar rangkaian listrik di mana tegangan pada rangkaian seri adalah penjumlahan tegangan dari setiap elemen piezoelektrik, sedangkan tegangan pada

rangkaian paralel cenderung mengikuti tegangan terkecil atau tegangan rata-rata unit. Temuan ini juga didukung oleh penelitian lain di bidang piezoelectric energy harvesting. Misalnya, [18] menyatakan bahwa rangkaian seri menghasilkan tegangan maksimum, sementara rangkaian paralel cenderung menghasilkan arus maksimum dengan bandwidth tegangan menengah. Selain itu, studi oleh Kallawa, A. F., Fikri, A., & Mujiroudin, M. (2022) juga mengungkapkan bahwa konfigurasi seri mampu menghasilkan tegangan yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi paralel, meskipun konfigurasi paralel unggul dalam menghasilkan arus listrik [19]. Disparitas Tegangan Aktual vs. Ideal Dalam studi ini, meskipun tegangan aktual yang dihasilkan tergolong tinggi (mencapai 174,7 V dalam rangkaian seri), nilainya masih lebih rendah dari tegangan ideal/teoritis. Disparitas ini (yang disebabkan oleh kehilangan energi, inkonsistensi gaya pijakan, dan ketidaksempurnaan sirkuit) adalah tantangan umum yang dihadapi pada sistem pemanen energi piezoelektrik. Dalam konteks efisiensi sistem dan kerugian energi, Wang menemukan bahwa kerugian energi pada rangkaian seri hanya seperlima dibandingkan dengan rangkaian paralel. Meskipun hasil tegangan aktual Anda menunjukkan rangkaian seri lebih dominan, data ini perlu dipertimbangkan untuk analisis efisiensi daya jangka panjang [20]. Selain itu, studi purwarupa lantai piezoelektrik lainnya (yang menggunakan mekanisme yang berbeda (seperti cantilever atau frequency up-converting) juga melaporkan bahwa meskipun tegangan puncak dapat mencapai 42 V, arus yang dihasilkan cenderung rendah (sekitar 11 μ A), menegaskan bahwa output daya (watt) sistem piezoelektrik masih relatif kecil dan memerlukan penyesuaian rangkaian daya untuk mencapai aplikasi komersial.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data pada prototipe lantai piezoelektrik, dapat disimpulkan bahwa sistem ini berhasil mengubah tekanan injakan kaki manusia menjadi energi listrik, baik pada konfigurasi rangkaian paralel maupun seri. Meskipun tegangan aktual yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan nilai ideal akibat kerugian energi dalam sistem nyata, seperti resistansi internal, ketidaksempurnaan tekanan, dan efisiensi rangkaian penyearah, tegangan total aktual tetap mencapai 3.298,4 V untuk konfigurasi paralel dan 6.903,7 V untuk konfigurasi seri. Tegangan ini dapat disimpan dalam baterai atau superkapasitor untuk mendukung aplikasi listrik berdaya rendah. Perbedaan antara nilai ideal dan aktual tidak mengurangi keberhasilan sistem, karena energi listrik tetap dapat dikumpulkan dan dimanfaatkan secara fungsional. Dengan demikian, sistem ini memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai sumber energi terbarukan di

area publik dengan lalu lintas pejalan kaki yang tinggi.

Saran

Agar prototipe lantai piezoelektrik dapat ditingkatkan dari segi kinerja dan efisiensi, beberapa hal disarankan, antara lain: menggunakan bahan piezoelektrik dengan sensitivitas lebih tinggi agar energi mekanik dapat diubah menjadi listrik lebih efisien; memperbaiki distribusi tekanan mekanik melalui desain lantai yang mampu menyebarkan injakan secara merata ke seluruh sensor piezoelektrik; mengoptimalkan rangkaian pengatur dan penyimpanan energi untuk meminimalkan kehilangan tegangan dan daya akibat komponen elektronik; melakukan pengujian jangka panjang untuk mengevaluasi performa sistem dalam kondisi lalu lintas pejalan kaki nyata; mengintegrasikan sistem dengan monitoring digital atau IoT agar data energi yang dihasilkan dapat dipantau dan dianalisis secara real-time; serta melakukan simulasi kelayakan ekonomis guna menilai potensi implementasi sistem ini secara berkelanjutan dalam skala besar.

Daftar Rujukan

- [1] Ahmed, S., Khan, R., 2021. Piezoelectric floor tiles for sustainable energy generation in public spaces. *Energy Conversion and Management*, 239, 114230
- [2] Lee, C., Wu, T., 2019. Optimization of piezoelectric energy harvesting circuits for low-power applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(7), pp.6132–6141.
- [3] Alavi, S.H., Rahman, M., Chen, L., 2024. Recent advances in piezoelectric energy harvesting for smart infrastructure applications. *Renewable Energy Systems Journal*, 12 (3), pp.210–225.
- [4] Sari, N.P., Pratama, Y., 2020. Studi eksperimental pemanfaatan piezoelektrik untuk penerangan lampu LED. *Jurnal Inovasi Energi Terbarukan*, 4(1), 22–30.
- [5] Wu, J., Zhao, D., 2020. Modeling and simulation of piezoelectric generators for wearable and flooring energy systems. *Renewable Energy*, 156, pp.120–130.
- [6] Supriandi, D., 2015. Perancangan sistem piezoelektrik untuk aplikasi energi terbarukan skala kecil. *Jurnal Rekayasa Energi*, 8(2), pp.56–63.
- [7] Luthfi, A., Haryanto, B., 2023. Analisis perbandingan konfigurasi seri dan paralel pada modul piezoelektrik untuk efisiensi energi. *Jurnal Rekayasa Energi Terbarukan*, 9(3), pp.88–96.
- [8] Triwahyudi, A., 2010. Pemanfaatan efek piezoelektrik untuk konversi energi mekanik menjadi energi listrik. *Jurnal Teknologi Elektro*, 5(1), pp.15–22.
- [9] Nurhayati, S., Widodo, A., 2018. Kajian efisiensi material piezoelektrik tipe PZT terhadap beban dinamis manusia. *Jurnal Rekayasa Material*, 6(3), pp.110–118.
- [10] Rahmawati, D., Fadillah, P., 2019. Analisis rangkaian penyearah (rectifier) pada sistem piezoelektrik berbasis PZT. *Jurnal Elektronika dan Instrumentasi*, 9(1), pp.33–40.
- [11] Fathoni, M., Yusuf, R. 2022. Perancangan sistem monitoring energi berbasis IoT pada panel piezoelektrik lantai. *Jurnal Teknologi Informasi dan Energi*, 10(1), pp.45–54.

- [12] Kumar, V., Singh, A., 2022. Experimental study on human footstep power generation using PZT materials. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 11(5), pp.341–349.
- [13] Zhang, X., Chen, J., 2023. Smart flooring systems using piezoelectric sensors for energy harvesting and occupancy detection. *Smart Materials and Structures*, 32(8), 085012.
- [14] Hidayatullah, M., Rahmad, F., Santoso, A., 2016. Analisis potensi energi piezoelektrik sebagai sumber energi alternatif dari getaran mekanik jalan raya. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 12(2), pp.87–94.
- [15] Ramadhan, R., Lestari, I., 2021. Penerapan konsep energy harvesting untuk sistem pencahayaan otomatis di gedung kampus. *Jurnal Teknologi dan Aplikasi Energi*, 7(2), pp.145–154.
- [16] Na'am J., Harlan J., Madenda S., Wibowo E.P., 2016. Identification of the Proximal Caries of Dental X-Ray Image with Multiple Morphology Gradient Method. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology (IJASEIT)*, 6(3), pp.343-346.
- [17] Na'am J., 2017. Edge Detection on Objects of Medical Image with Enhancement multiple Morphological Gradient (EmMG) Method. 4th Proc. EECSI. 23-24 Sep. 2017.
- [18] Lin, Y., Zhang, J., Wang, Y., Wen, S., 2020. Study of the effect of connection type on piezoelectric energy harvester. *International Journal of Electrical Engineering (IJEE)*, 7(1), pp.1-8.
- [19] Kallawa, A. F., Fikri, A., & Mujiurudin, M. (2022). Pengaruh Rangkaian Seri Dan Paralel Terhadap Tegangan Pada Piezoelektrik, 1, pp.52–57.
- [20] Jiang, F., Liu, C., He, W., Chen, J., 2022. Design and Comparative Study of a Small-Stroke Energy Harvesting Floor Based on a Multi-Layer Piezoelectric Beam Structure. *Micromachines*, 13, pp.1-14.