

**PEMBANGKIT LISTRIK MENGGUNAKAN
PIEZOELEKTRIK DENGAN MEMANFAATKAN TEKANAN
DARI PIJAKAN KAKI MANUSIA PADA LANTAI**

PROYEK AKHIR

Laporan akhir ini dibuat dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat Kelulusan Sarjana Terapan Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung



Disusun Oleh

Bram Tirta NIM: 1052234

Gerhana NIM: 1052239

**POLITEKNIK MANUFAKTUR NEGERI
BANGKA BELITUNG
TAHUN 2025**

LEMBAR PENGESAHAN

JUDUL PROYEK AKHIR

**PEMBANGKIT LISTRIK MENGGUNAKAN PIEZOELEKTRIK
DENGAN MEMANFAATKAN TEKANAN DARI PIJAKAN KAKI
MANUSIA PADA LANTAI**

Oleh:

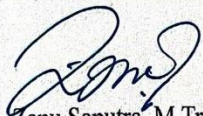
Bram Tirta/1052234

Gerhana/1052239

Laporan akhir ini telah disetujui dan disahkan sebagai salah satu syarat kelulusan
Program Sarjana Terapan Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Menyetujui,

Pembimbing 1



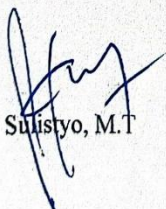
Zanu Saputra, M.Tr.T.

Pembimbing 2



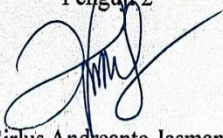
Pepizal, M.Pd.T.

Penguji 1



Eko Sulisty, M.T

Penguji 2



Sirlus Andreanto Jasman
Duli, S.Pd., M.T.

PERNYATAAN BUKAN PLAGIAT

Yang bertanda tangan di bawah ini:

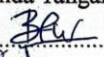
Nama Mahasiswa 1 : Bram Tirta NIM: 1052234
Nama Mahasiswa 2 : Gerhana NIM: 1052239

Dengan Judul : Pembangkit Listrik Menggunakan Piezoelektrik
Dengan Memanfaatkan Tekanan Dari Pijakan
Kaki Manusia Pada Lantai

Menyatakan bahwa laporan akhir ini adalah hasil kerja kami sendiri dan bukan merupakan plagiat. Pernyataan ini kami buat dengan sebenarnya dan bila ternyata dikemudian hari ternyata melanggar pernyataan ini, kami bersedia menerima sanksi yang berlaku.

Sungailiat, 17 Juli 2025

Nama Mahasiswa
1. Bram Tirta
2. Gerhana

Tanda Tangan



ABSTRAK

Pertumbuhan kebutuhan energi global mendorong pencarian sumber energi alternatif yang ramah lingkungan, salah satunya melalui teknologi piezoelektrik. Namun, tantangan utama dalam pemanfaatannya adalah rendahnya output energi yang dihasilkan serta ketidakstabilan akibat variasi beban dan tekanan. Penelitian ini bertujuan merancang sistem pembangkit energi listrik menggunakan elemen piezoelektrik yang dapat digunakan untuk mengisi baterai secara efektif, dengan pendekatan konfigurasi optimal serta integrasi sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Metode penelitian yang digunakan adalah Research and Development (R&D), dimulai dari uji konfigurasi seri-seri, paralel-seri, seri-paralel, hingga paralel-paralel, dengan pengujian variasi massa (69 kg dan 98 kg) dan metode tekanan (melompat dan berjalan). Hasil menunjukkan konfigurasi paralel-paralel menghasilkan arus rata-rata tertinggi sebesar 12,26 mA dan tegangan 9,82 V, menjadikannya konfigurasi terbaik untuk proses pengisian. Pengujian juga menunjukkan bahwa metode melompat menghasilkan impedansi lebih rendah dan output daya lebih besar. Sistem dikembangkan hingga mampu mengisi baterai 18650 secara bertahap dengan tegangan yang terakumulasi. Meskipun waktu pengisian penuh masih sangat lama yaitu berkisar 70 hingga 100 hari, pendekatan ini membuktikan potensi sistem piezoelektrik sebagai sumber daya alternatif. Disarankan penggantian baterai dengan kapasitas lebih kecil, peningkatan jumlah elemen piezoelektrik, serta optimalisasi sistem IoT untuk kontrol dan monitoring tanpa membebani sumber energi.

Kata kunci: piezoelektrik, energi alternatif, IoT, konfigurasi paralel, R&D.

ABSTRACT

The growing global demand for energy has driven the search for environmentally friendly alternative sources, one of which is piezoelectric technology. However, its application faces major challenges due to the low power output and instability caused by load and pressure variations. This research aims to design an electrical energy harvesting system using piezoelectric elements capable of effectively charging batteries through optimal configuration and integration with an Internet of Things (IoT)-based monitoring system. The research method follows a Research and Development (R&D) approach, beginning with testing four configurations: series-series, parallel-series, series-parallel, and parallel-parallel. Testing involved mass variations (69 kg and 98 kg) and two pressure methods (stepping and jumping). Results show that the parallel-parallel configuration produced the highest average current of 12.26 mA and voltage of 9.82 V, making it the most suitable for battery charging. Additionally, jumping yielded lower impedance and higher power output than walking. The system was further developed to gradually charge a 3.7V 18650 battery using accumulated voltage. Although the full charging time remains long, ranging from 70 to 100 days, the findings demonstrate the potential of piezoelectric systems as alternative energy sources. Recommendations include replacing the battery with one of lower capacity, increasing the number of piezoelectric elements in parallel to boost current, and optimizing the IoT-based control and monitoring system to avoid burdening the energy source.

Keywords: piezoelectric, alternative energy, IoT, parallel configuration, R&D.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Dengan mengucapkan *Alhamdullilahi Rabbil Alamin*, segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan penulis kemudahan sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Proyek Akhir dengan judul “Pembangkit Listrik Menggunakan Piezoelektrik Dengan Memanfaatkan Tekanan Dari Pijakan Kaki Manusia Pada Lantai” dengan baik dan tepat pada waktunya.

Laporan Proyek Akhir ini sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Terapan Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung. Proyek Akhir ini dilaksanakan di area Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung selama 1 semester.

Penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan laporan ini, penulis mengalami beberapa hambatan dan kesulitan baik dari segi materi, segi pengerjaan, maupun segi penyajian. Namun berkat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak akhirnya laporan Proyek Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa syukur dan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penulis selama masa Pengerjaan Proyek Akhir yaitu kepada:

1. Kedua Orang Tua penulis yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi, dan doa yang terbaik kepada penulis untuk melaksanakan Proyek Akhir sampai dengan menyelesaikan Laporan Proyek Akhir.
2. Bapak I Made Andik Setiawan, M.Eng, Ph.D. selaku Direktur Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung.
3. Bapak Zanu Saputra, M.Tr.T. selaku Kepala Jurusan Teknik Rekayasa Elektro dan Industri Pertanian.
4. Bapak Aan Febriasyah, M.T. selaku Kepala Program Studi D-IV Teknik Elektronika.
5. Bapak Surojo, S.T.,M.T. selaku Dosen Wali.

6. Bapak Zanu Saputra, M.Tr.T. selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan saran serta motivasi kepada penulis.

Bapak Peprizal, M.Pd.T. selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan saran serta motivasi kepada penulis.

7. Rekan-rekan yang telah membantu dan memberikan motivasi kepada penulis dalam proses pengerjaan Proyek Akhir.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari kata sempurna dan masih banyak terdapat kesalahan serta kekurangan di dalamnya. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik serta saran dari pembaca dan penguji agar laporan ini dapat menjadi laporan yang lebih baik lagi. Semoga laporan ini bermanfaat untuk pembaca maupun penulis, akhir kata penulis mengucapkan terima kasih.

Sungailiat, 17 Juli 2025

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN BUKAN PLAGIAT	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
1.5. Batasan Masalah.....	4
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1. Piezoelektrik.....	5
2.2. Penyearah Gelombang Penuh	8
2.3. Buck Boost LM2577 + LM2596.....	10
2.4. ESP-32	10
2.5. INA226.....	11
2.6. Kapasitor	11
BAB III METODE PELAKSANAAN	13
3.1. Research & Information Collecting	14
3.2. <i>Planning</i>	14
3.3. <i>Develop Preliminary Form of Product</i>	14
3.4. <i>Preliminary Field Testing</i>	14
3.5. <i>Develop Main Form of Product</i>	15
3.6. <i>Main Field Testing</i>	15
3.7. <i>Implementation</i>	15

3.8. <i>Analysis</i>	15
BAB IV PEMBAHASAN.....	17
4.1. <i>Research & Colecting Information</i>	17
4.2. <i>Planning</i>	18
4.3 Develop Preliminary Form of Product.....	21
4.4. Preliminary Field Testing	22
4.5. Develop Main Form of Product	45
4.6 Main Field Testing	61
4.6.1 Uji Konfigurasi Pada Rangkaian Terbuka dan Berbeban 1 ohm	61
4.6.2 Uji Konfigurasi Pada Rangkaian Pengecasan	66
4.6.3 Pengujian Pada Osiloskop	72
4.6.4 Menghitung Impedansi Sistem.....	76
4.7. Implementation	77
4.8. Analysis	84
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	87
5.1. Kesimpulan	87
5.2. Saran.....	88
DAFTAR PUSTAKA	90

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Percobaan 1 Rangkaian Seri-Seri (16 seri dan 16 seri) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	2222
Tabel 4.2 Percobaan 2 Rangkaian Seri-Seri (16 seri dan 16 seri) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	24
Tabel 4.3 Percobaan 3 Rangkaian Seri-Seri (16 seri dan 16 seri) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	26
Tabel 4.4 Percobaan 1 Rangkaian Paralel-Paralel (16 paralel dan 16 paralel) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	28
Tabel 4.5 Percobaan 2 Rangkaian Paralel-Paralel (16 paralel dan 16 paralel) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	30
Tabel 4.6 Percobaan 3 Rangkaian Paralel-Paralel (16 paralel dan 16 paralel) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	31
Tabel 4.7 Percobaan 1 Rangkaian Seri-Paralel (16 Seri dan 16 paralel) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	32
Tabel 4.8 Percobaan 2 Rangkaian Seri-Paralel (16 Seri dan 16 paralel) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	34
Tabel 4.9 Percobaan 3 Rangkaian Seri-Paralel (16 Seri dan 16 paralel) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	36
Tabel 4.10 Percobaan 1 Rangkaian Paralel-Seri (16 Paralel dan 16 Seri) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	37
Tabel 4.11 Percobaan 2 Rangkaian Paralel-Seri (16 Paralel dan 16 Seri) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	39
Tabel 4.12 Percobaan 3 Rangkaian Paralel-Seri (16 Paralel dan 16 Seri) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	41
Tabel 4.13 Pengujian Blok 1 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	45
Tabel 4.14 Pengujian Blok 1 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	46
Tabel 4.15 Pengujian Blok 2 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	47
Tabel 4.16 Pengujian Blok 2 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	48
Tabel 4.17 Pengujian Blok 3 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	49
Tabel 4.18 Pengujian Blok 3 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	49
Tabel 4.19 Pengujian Blok 4 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	50
Tabel 4.20 Pengujian Blok 4 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	52
Tabel 4.21 Pengujian Blok 5 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	52

Tabel 4.22 Pengujian Blok 5 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	53
Tabel 4.23 Pengujian Blok 6 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	54
Tabel 4.24 Pengujian Blok 6 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	55
Tabel 4.25 Pengujian Blok 7 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	55
Tabel 4.26 Pengujian Blok 7 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	56
Tabel 4.27 Pengujian Blok 8 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	57
Tabel 4.28 Pengujian Blok 8 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	57
Tabel 4.29 Pengujian Blok 9 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	58
Tabel 4.30 Pengujian Blok 9 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	59
Tabel 4.31 Pengujian dengan metode berjalan melintas menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	61
Tabel 4.32 Pengujian dengan metode berjalan melintas menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	61
Tabel 4.33 Pengujian dengan metode melompat menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	63
Tabel 4.34 Pengujian dengan metode melompat menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus	63
Tabel 4.35 Pengujian dengan metode berjalan melintas menggunakan massa 69kg dan beban rangkaian pengecasan	66
Tabel 4.36 Pengujian dengan metode berjalan melintas menggunakan massa 98kg dan beban rangkaian pengecasan	66
Tabel 4.37 Pengujian dengan metode melompat menggunakan massa 69kg dan beban rangkaian pengecasan	67
Tabel 4.38 Pengujian dengan metode melompat menggunakan massa 69kg dan beban rangkaian pengecasan	68
Tabel 4.39 Data Percobaan Monitoring Tegangan (V) Output Sistem Menggunakan Sensor INA226 Pada Kapasitor 470uF	77
Tabel 4.40 Data Percobaan Monitoring Arus (mA) Output Sistem Menggunakan Sensor INA226.....	78
Tabel 4.41 Pengujian pengecasan baterai 18650 (3,7V 1500mAh) menggunakan massa 69kg.....	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Polarisasi Piezoelektrik: A. Tidak tepolarisasi, B. Terpolarisasi.....	5
Gambar 2.2 Struktur Material Piezoelektrik	5
Gambar 2.3 Piezoelektrik.....	6
Gambar 2.4 Datasheet Piezoelektrik	6
Gambar 2.5 TP24056	10
Gambar 2.6 ESP-32.....	11
 Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	 13
 Gambar 4.1 Blok Diagram Sistem	 19
Gambar 4.2 Wiring Sistem.....	21
Gambar 4.3 Struktur Pemanen Energi Piezoelektrik	21
Gambar 4.4 Pengujian 1 Konfigurasi Seri-Seri Pengukuran Tegangan	23
Gambar 4.5 Pengujian 1 Konfigurasi Seri-Seri Pengukuran Arus.....	23
Gambar 4.6 Pengujian 2 Konfigurasi Seri-Seri Pengukuran Tegangan	25
Gambar 4.7 Pengujian 2 Konfigurasi Seri-Seri Pengukuran Arus.....	25
Gambar 4.8 Pengujian 3 Konfigurasi Seri-Seri Pengukuran Tegangan	26
Gambar 4.9 Grafik Pengujian Osiloskop Sinyal Keluaran Dari Konfigurasi seri-seri Sistem.....	27
Gambar 4.10 Pengujian 3 Konfigurasi Seri-Seri Pengukuran Arus	27
Gambar 4.11 Pengujian 1 Konfigurasi Paralel-Paralel Pengukuran Tegangan.....	28
Gambar 4.12 Pengujian 1 Konfigurasi Paralel-Paralel Pengukuran Arus.....	29
Gambar 4.13 Grafik Pengujian Osiloskop Sinyal Keluaran Dari Konfigurasi Paralel-Paralel Sistem	29
Gambar 4.14 Pengujian 2 Konfigurasi Paralel-Paralel Pengukuran Tegangan.....	30
Gambar 4.15 Pengujian 2 Konfigurasi Paralel-Paralel Pengukuran Arus.....	31
Gambar 4.16 Pengujian 3 Konfigurasi Paralel-Paralel Pengukuran Tegangan.....	32
Gambar 4.17 Pengujian 3 Konfigurasi Paralel-Paralel Pengukuran Arus.....	32
Gambar 4.18 Pengujian 1 Konfigurasi Seri-Paralel Pengukuran Tegangan	34
Gambar 4.19 Grafik Pengujian Osiloskop Sinyal Keluaran Dari Konfigurasi Seri-Paralel Sistem.....	34
Gambar 4.20 Pengujian 1 Konfigurasi Seri-Paralel Pengukuran Arus	34
Gambar 4.21 Pengujian 2 Konfigurasi Seri-Paralel Pengukuran Tegangan	36
Gambar 4.22 Pengujian 2 Konfigurasi Seri-Paralel Pengukuran Arus	36
Gambar 4.23 Pengujian 3 Konfigurasi Seri-Paralel Pengukuran Tegangan	37
Gambar 4.24 Pengujian 3 Konfigurasi Seri-Paralel Pengukuran Arus	37
Gambar 4.25 Pengujian 1 Konfigurasi Paralel-Seri Pengukuran Tegangan	39

Gambar 4.26 Grafik Pengujian Osiloskop Sinyal Keluaran Dari Konfigurasi Paralel-Seri Sistem	39
Gambar 4.27 Pengujian 1 Konfigurasi Paralel-Seri Pengukuran Arus	39
Gambar 4.28 Pengujian 2 Konfigurasi Paralel-Seri Pengukuran Tegangan	40
Gambar 4.29 Pengujian 2 Konfigurasi Paralel-Seri Pengukuran Arus	41
Gambar 4.30 Pengujian 3 Konfigurasi Paralel-Seri Pengukuran Tegangan	42
Gambar 4.31 Pengujian 3 Konfigurasi Paralel-Seri Pengukuran Arus	42
Gambar 4.32 Grafik Perbandingan Arus (mA) 4 Kombinasi Konfigurasi.....	44
Gambar 4.33 Grafik Perbandingan Tegangan (V) 4 Kombinasi Konfigurasi.....	44
Gambar 4.34 Pengujian Blok 1 Dengan Massa 69kg Pengukuran Tegangan.....	46
Gambar 4.35 Pengujian Blok 1 Dengan Massa 69kg Pengukuran Arus.....	46
Gambar 4.36 Pengujian Blok 2 Dengan Massa 69kg Pengukuran Tegangan.....	48
Gambar 4.37 Pengujian Blok 2 Dengan Massa 69kg Pengukuran Arus.....	48
Gambar 4.38 Pengujian Blok 4 Dengan Massa 69kg Pengukuran Tegangan.....	52
Gambar 4.39 Pengujian Blok 4 Dengan Massa 69kg Pengukuran Arus.....	52
Gambar 4.40 Pengujian Blok 8 Dengan Massa 98kg Pengukuran Arus.....	59
Gambar 4.41 Pengujian Blok 8 Dengan Massa 98kg Pengukuran Tegangan.....	59
Gambar 4.42 Pengujian menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus dengan metode melintas	63
Gambar 4.43 Pengujian menggunakan massa 98kg pada rangkaian terbuka pengukuran tegangan dengan metode melintas.....	63
Gambar 4.44 Grafik perbandingan output dengan metode melompat dan melintas	66
Gambar 4.45 Pengujian menggunakan massa 98kg dan beban rangkaian pengecasan pada pengukuran arus dengan metode melompat.....	69
Gambar 4.46 Pengujian menggunakan massa 98kg dan beban rangkaian pengecasan pada pengukuran tegangan dengan metode melompat	70
Gambar 4.47 Grafik perbandingan output dengan metode mmpat dan melintas pada rangkaiain pengecasan	71
Gambar 4.48 Grafik Pengujian 2 Metode (Melompat dan Berjalan Normal) Menggunakan Massa 69kg.....	71
Gambar 4.49 Grafik Pengujian 2 Metode (Melompat dan Berjalan Normal) Menggunakan Massa 98kg.....	72
Gambar 4.50 Pengecekan sinyal sistem menggunakan massa 69kg dengan metode melintas	73
Gambar 4.51 Pengecekan sinyal sistem menggunakan massa 98kg dengan metode melintas	74
Gambar 4.52 Pengecekan sinyal sistem menggunakan massa 69kg dengan metode melompat pada prototipe.....	74
Gambar 4.53 Pengecekan sinyal sistem menggunakan massa 98kg dengan metode melompat pada prototipe.....	75
Gambar 4.54 Monitoring Realtime Menggunakan Blynk	78
Gambar 4.55 Pengukuran Tegangan Awal Baterai.....	80
Gambar 4.56 Pengukuran Tegangan Kapasitor.....	80
Gambar 4.57 Pengukuran Arus Pengecasan.....	81
Gambar 4.58 Pengukuran Tegangan Akhir Baterai.....	81

Gambar 4.59 Pengukuran Arus Balik Baterai	82
Gambar 4.60 Monitoring Daya Menggunakan Blynk	86



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. 1 Daftar Riwayat Hidup.....	92
Lampiran 2. 1 Program Monitoring	95
Lampiran 3. 1 Dokumentasi Pengerjaan Keseluruhan	99



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pertumbuhan populasi merupakan hal yang tidak bisa dihindari. Kenaikan jumlah penduduk berbanding lurus dengan kebutuhan energi dan sumber daya, namun berbanding terbalik dengan sumber daya energi yang terus berkurang [1,2]. Seiring kenaikan populasi manusia, konsumsi energi pun meningkat drastis di berbagai sektor seperti transportasi, industri, dan rumah tangga. Hal ini menyebabkan penggunaan energi konvensional, terutama energi fosil, semakin besar [3]. Ketersediaan energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam yang tidak terbarukan menyebabkan sumber energi ini akan habis jika digunakan secara terus-menerus [4]. Selain keterbatasan ketersediaannya, energi fosil juga memiliki berbagai kekurangan, di antaranya adalah menghasilkan emisi karbon yang tinggi, mencemari lingkungan, mempercepat perubahan iklim, serta menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia [5].

Sebagai respons terhadap tantangan tersebut, pengembangan sumber energi alternatif dan terbarukan menjadi hal yang sangat mendesak [6]. Energi terbarukan seperti surya, angin, dan air telah menjadi fokus utama berbagai riset dan implementasi. Namun, masih banyak potensi energi lain yang belum dimanfaatkan secara optimal, salah satunya adalah energi mekanik yang dihasilkan oleh aktivitas manusia sehari-hari, seperti berjalan atau melangkah [7]. Salah satu inovasi yang dapat dikembangkan untuk menjadi potensi sumber energi adalah pemanfaatan piezoelektrik sebagai pemanen energi listrik pada lantai [8]. Piezoelektrik adalah perangkat transduser yang berfungsi untuk mengonversi energi mekanik menjadi energi listrik, atau sebaliknya [9]. Listrik yang dihasilkan pada piezoelektrik akibat tekanan mekanik dikenal sebagai efek piezoelektrik [10].

Dengan memanfaatkan elemen piezoelektrik, seperti kristal atau keramik, sistem ini dapat mengonversi energi dari aktivitas sehari-hari, termasuk getaran dari pijakan kaki manusia yang melintas pada lantai menjadi energi listrik dengan efek

piezoelektrik [10]. Berdasarkan hukum kekekalan energi, energi tidak dapat diciptakan ataupun dihilangkan, maka dari itu eksplorasi energi yang terbuang dari lantai dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik yang ramah lingkungan dan dapat dikembangkan untuk di masa mendatang [11]. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi dan membuktikan bahwa energi mekanik dari pijakan kaki manusia dapat diubah dan dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik yang nyata dan aplikatif. Kami menargetkan sistem yang dikembangkan mampu menghasilkan daya minimum sebesar 10 watt, yang kemudian disimpan ke dalam sistem penyimpanan energi. Energi ini diharapkan mampu digunakan untuk menghidupkan perangkat elektronik, seperti lampu LED berdaya 3 watt, sebagai bukti bahwa energi terbuang dapat diolah menjadi energi fungsional yang mendukung kebutuhan listrik skala kecil.

Selain itu dalam penelitian ini, kami tidak hanya mengandalkan pengumpulan energi melalui piezoelektrik, tetapi juga mengintegrasikan teknologi Internet of Things (IoT) untuk memantau secara real-time parameter kelistrikan yang dihasilkan, seperti tegangan dan arus. Monitoring berbasis IoT ini memungkinkan pengguna atau peneliti untuk menganalisis performa sistem secara langsung, efisien, dan akurat [12]. Data yang dikumpulkan juga dapat menjadi acuan dalam pengambilan keputusan pengembangan sistem ke tahap selanjutnya, serta membuka peluang untuk integrasi sistem kontrol otomatis di masa depan. Melalui pendekatan ini, penelitian kami tidak hanya memberikan solusi terhadap masalah keterbatasan energi fosil, tetapi juga menghadirkan peluang baru dalam menciptakan lingkungan yang lebih berkelanjutan, efisien, dan teknologis. Dengan demikian, sistem piezoelektrik berbasis IoT yang dikembangkan dapat menjadi bagian dari solusi masa depan dalam membangun kota cerdas (smart city) yang hemat energi dan ramah lingkungan.

1.2. Rumusan Masalah

1. Apa Konfigurasi Terbaik Yang Aplikatif Untuk Melakukan Pengecasan?
2. Bagaimana Potensi Energi Listrik Yang Dihasilkan Piezoelektrik Dari Pijakan Kaki Manusia?

3. Bagaimana Kinerja Sistem Piezoelektrik Pada Lantai Untuk Aplikasi Pengecasan?
4. Bagaimana Piezoelektrik Pada Lantai Berkontribusi Dalam Energi Alternatif?

1.3. Tujuan Penelitian

1. Menemukan Konfigurasi Terbaik Untuk Menghasilkan Listrik Tenaga Tekan Menggunakan Piezoelektrik Dalam Aplikasi Pengecasan.
2. Mengetahui Potensi Energi Murni Keluaran Sistem Pemanen Energi Pada Lantai.
3. Mengetahui Kinerja Sistem Piezoelektrik Pada Lantai Untuk Melakukan Pengecasan
4. Mengetahui Potensi Kontribusi Piezoelektrik Pada Energi Alternatif

1.4. Manfaat Penelitian

1. Pengurangan Ketergantungan Pada Energi Konvensional
Sistem piezoelektrik pada lantai dapat menghasilkan energi dari aktivitas manusia dan termasuk sumber energi terbarukan sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada energi konvensional.
2. Peningkatan Kesadaran Energi
Penelitian ini juga berfungsi untuk meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya pemanfaatan energi alternatif dan terbarukan serta keberlanjutan. Dengan menunjukkan bagaimana langkah kaki dapat diubah menjadi energi listrik, masyarakat diharapkan lebih peduli terhadap penggunaan energi dan lingkungan.
3. Inovasi Sumber Energi Alternatif dan Terbarukan

Pembangkit listrik berbasis piezoelektrik menawarkan alternatif sebagai sumber energi terbarukan. Dengan memanfaatkan tekanan dari pijakan kaki manusia, sistem ini dapat menghasilkan listrik tanpa menghasilkan polusi, sehingga berkontribusi terhadap pengurangan dampak negatif terhadap lingkungan

4. Salah Satu Solusi Menghadapi Kelangkaan Energi di Masa Mendatang

Di masa mendatang dikhawatirkan akan terjadi kelangkaan energi seiring pertumbuhan populasi di dunia, oleh karena itu diprediksi sistem piezoelektrik pada lantai dapat menjadi salah satu solusi untuk mengatasi kelangkaan energi di masa mendatang.

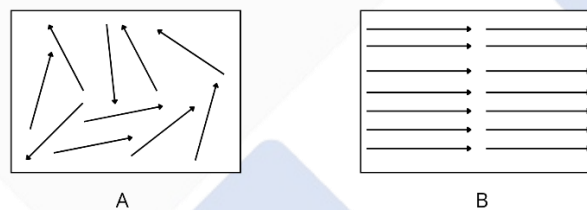
1.5. Batasan Masalah

1. Penelitian ini difokuskan pada penggunaan material piezoelektrik standar jenis PZT yang tersedia secara komersial, tanpa eksplorasi material piezoelektrik eksperimental atau modifikasi material.
2. Penelitian ini akan menggunakan material piezoelektrik jenis keramik dan tidak akan mempertimbangkan material piezoelektrik lainnya atau kombinasi material.
3. Output daya listrik yang diukur akan terbatas pada pengukuran tegangan dan arus dalam interval pijakan 50 sampai dengan 250, tanpa analisis jangka panjang mengenai daya tahan sistem atau degradasi material piezoelektrik.

BAB II DASAR TEORI

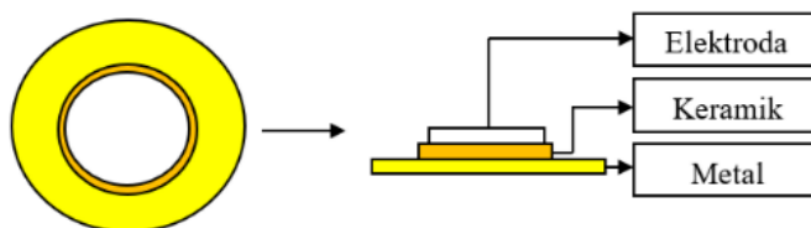
2.1. Piezoelektrik

Piezoelektrik merupakan perangkat yang mampu memanfaatkan gaya eksternal untuk menghasilkan listrik sebagai pemanen energi [13]. Piezoelektrik memanfaatkan efek piezoelektrik untuk menghasilkan energi listrik dari perubahan polarisasi elektron. Efek piezoelektrik merupakan proses konversi energi dengan memanfaatkan tekanan mekanik pada suatu elemen untuk menghasilkan energi [10]. Elektron yang sebelumnya bergerak acak menjadi teratur dan terkutub, menghasilkan tegangan listrik. Semakin besar tekanan, semakin besar pula tegangan yang dihasilkan.



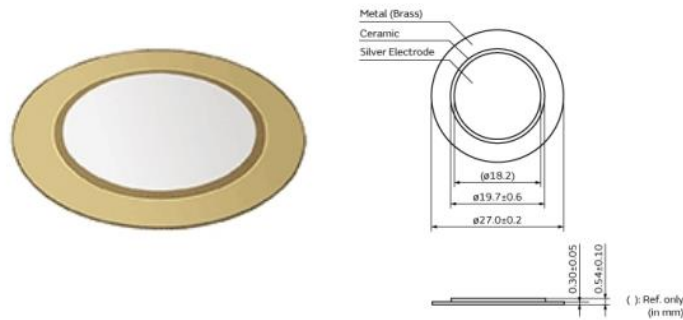
Gambar 2. 1 Polarisasi Piezoelektrik: A. Tidak tepolarisasi, B. Terpolarisasi

Bahan piezoelektrik adalah material yang dapat menghasilkan listrik dari tekanan mekanis. Bahan piezoelektrik dibedakan menjadi dua yaitu alami diantaranya, kuarsa (Quartz, SiO_2), Turmalin, Berlinite serta Garam Rossel diperoleh sebagai bahan alami, dan buatan diantaranya Lead zirconiumtitanate (PZT), Barium titanate (BaTiO_3), Lead titanate (PbTiO_3)[3].



Gambar 2. 2 Struktur Material Piezoelektrik

Piezoelektrik memiliki ketahanan operasi pada suhu -20 derajat celcius sampai dengan 70 derajat celcius. Selain itu kapasitas dari piezoelektrik adalah 20nF dengan toleransi kapasistas 30%. Piezoelektrik yang digunakan memiliki massa 1968 mg dengan bahan material brass/kuningan (metal) sebagai pelapis piringan.



Gambar 2. 3 Piezoelektrik



Specifications

Resonance Frequency	4.6kHz
Resonant Frequency Tolerance	±0.5kHz
Resonant Impedance (R1)	200Ω
Capacitance	20nF
Capacitance Tolerance	±30%
Measurement Condition of Capacitance	[1kHz]
Operating Temperature Range	-20°C to 70°C
Storage Temperature Range	-30°C to 80°C
Shape	No lead wire
Plate Size	27mm
Element Size	19.7mm
Plate Material	Brass
Drive Type	External Drive
EIAJ Part Number	PD-SU2-C27-46
Mass	1968mg

Gambar 2. 4 Datasheet Piezoelektrik

Secara teoritis, besarnya tegangan output yang dihasilkan oleh suatu elemen piezoelektrik dalam kondisi rangkaian terbuka yaitu ketika tidak ada arus yang mengalir keluar dari elemen tersebut dapat dihitung berdasarkan hubungan antara gaya mekanik yang diterapkan dan respons listrik dari material piezoelektrik, dengan menggunakan persamaan berikut [14]:

$$\text{Tegangan (V)} = \frac{\text{konstanta piezoelektrik (d)} \times \text{Gaya (F)}}{\text{Kapasitansi Piezoelektrik (C)}}$$

Di mana:

V = tegangan output(V)

d = konstanta piezoelektrik (pC/N)

F = gaya mekanik yang diberikan (N)

C = kapasitansi piezoelektrik (F)

Selain itu penelitian terdahulu dijadikan sebagai dasar untuk pengembangan potensi piezoelektrik sebagai pembangkit listrik, seperti penelitian oleh Hidayatullah et al. (2016) menunjukkan bahwa penggunaan 30 keping piezoelektrik tipe ABT-441-RC yang dirangkai paralel mampu menghasilkan tegangan sebesar 0,702 V ketika diberi gaya sebesar 49 N. Mereka juga menekankan pentingnya desain alas pijakan dalam memengaruhi efisiensi energi yang dihasilkan serta ketahanan bahan piezoelektrik yang cukup rapuh.

Sementara itu, penelitian oleh Stiawan dan Taufiq (2020) mengembangkan sistem piezoelektrik berbasis tekanan mekanik menggunakan 35 keping piezoelektrik yang disusun secara paralel. Hasilnya menunjukkan bahwa beban pijakan yang lebih berat akan meningkatkan tegangan dan arus output. Dengan berat pijakan antara 55 kg hingga 85 kg, mereka memperoleh tegangan keluaran antara 3,54 V hingga 6,08 V sebelum beban, dan 2,15 V hingga 2,23 V setelah beban (Stiawan & Taufiq, 2020). Arus maksimum yang tercapai adalah 0,027 mA, menandakan bahwa meskipun tegangan cukup tinggi, arus yang dihasilkan masih

tergolong rendah dan bersifat sementara, sehingga perlu penyimpanan energi menggunakan kapasitor.

Penelitian lain oleh Endang et al. (2020) membandingkan pengaruh konfigurasi rangkaian seri dan paralel pada keluaran piezoelektrik. Hasilnya menunjukkan bahwa konfigurasi paralel lebih efektif dalam meningkatkan arus keluaran, sedangkan konfigurasi seri mampu meningkatkan tegangan keluaran. Penelitian ini menggunakan prototipe pijakan manusia sebagai sumber tekanan dan menunjukkan bahwa kombinasi rangkaian dan desain mekanis berpengaruh besar terhadap hasil keluaran sistem. Mereka juga menambahkan bahwa meskipun satu keping piezoelektrik dapat menghasilkan hingga 7 VDC, arusnya sangat kecil (sekitar 5 μA), dan dengan 25 keping yang disusun paralel, arus meningkat hingga sekitar 105 μA (Endang et al., 2020).

Dari berbagai penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan teknologi piezoelektrik dalam sistem pemanen energi masih memiliki keterbatasan pada besarnya daya yang dihasilkan. Untuk mengoptimalkannya, pendekatan yang paling umum dilakukan adalah melalui penggabungan banyak keping piezoelektrik dalam konfigurasi paralel dan/atau seri, serta penggunaan sistem penyimpanan energi seperti kapasitor. Selain itu, desain struktur fisik alat (terutama bagian alas atau permukaan injakan) sangat mempengaruhi efisiensi konversi energi. Oleh karena itu, fokus penelitian lanjutan diarahkan pada pencarian konfigurasi optimal dan efisiensi mekanis agar sistem ini dapat digunakan dalam skala lebih luas sebagai sumber energi alternatif.

2.2. Penyearah Gelombang Penuh

Penyearah (rectifier) merupakan komponen penting dalam sistem elektronik yang berfungsi mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC). Dalam konteks sistem pemanen energi berbasis piezoelektrik, penyearah sangat diperlukan karena sinyal listrik yang dihasilkan oleh elemen piezo bersifat fluktuatif dan menyerupai bentuk gelombang AC akibat tekanan mekanis berulang. Tanpa penyearahan, energi ini tidak dapat disimpan secara efisien dalam komponen seperti kapasitor atau digunakan langsung oleh beban DC.

Salah satu metode penyearahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah penyearah gelombang penuh (full-wave rectifier) dengan konfigurasi jembatan dioda (bridge rectifier). Rangkaian ini menggunakan empat buah dioda yang disusun sedemikian rupa sehingga kedua sisi siklus sinyal AC (positif dan negatif) dikonversi menjadi arus searah. Keunggulan utama dari penyearah gelombang penuh adalah efisiensinya yang tinggi karena mampu memanfaatkan seluruh siklus dari sinyal piezoelektrik [15]. Hal ini menjadikannya sangat efektif untuk aplikasi energi mikro di mana energi yang tersedia terbatas dan bersifat impulsif.

Dalam sistem piezoelektrik, pemilihan jenis penyearah sangat penting karena berkaitan langsung dengan fenomena charge cancellation yaitu kondisi di mana muatan dari satu elemen piezo mengalir ke elemen lain yang sedang tidak tertekan atau berada dalam fase berbeda, sehingga menghasilkan pembatalan arus. Penyearah gelombang penuh dapat menghilangkan fenomena ini karena memastikan bahwa arus dari semua elemen hanya mengalir dalam satu arah menuju beban, terlepas dari polaritas input pada siklus tertentu. Sementara itu, penyearah setengah gelombang (half-wave rectifier) hanya menggunakan satu siklus (positif atau negatif) dan membuang setengah lainnya, sehingga tidak hanya menyebabkan efisiensi rendah, tetapi juga tidak mampu mencegah charge cancellation secara menyeluruh. Bahkan pada sistem piezoelektrik dengan banyak elemen, charge cancellation bisa terjadi lebih sering karena arus negatif tidak diarahkan dengan baik menuju beban.

Untuk membangun penyearah gelombang penuh ini, digunakan dioda tipe IN4007. IN4007 merupakan dioda silikon penyearah arus searah yang dirancang untuk menangani tegangan balik hingga 1000 volt dan arus hingga 1 ampere. Pemilihan dioda ini didasarkan pada kemampuannya dalam menahan lonjakan tegangan (voltage spike) yang sering terjadi akibat tekanan mekanik mendadak pada elemen piezoelektrik. Dioda IN4007 juga memiliki karakteristik switching yang andal dan tersedia secara luas dengan harga ekonomis, menjadikannya ideal untuk sistem pemanen energi skala kecil.

Dengan demikian, penggunaan penyearah gelombang penuh berbasis bridge dan dioda IN4007 dalam penelitian ini merupakan strategi yang paling efektif untuk

mengoptimalkan hasil konversi energi, mencegah kehilangan daya akibat pembatalan muatan, dan menghasilkan output arus searah yang stabil untuk keperluan penyimpanan atau distribusi daya lebih lanjut.

2.3. TP4056

TP4056 adalah sebuah modul pengisi daya berbasis IC manajemen baterai lithium-ion yang dirancang untuk mengisi baterai dengan tegangan nominal 3,7V secara efisien dan aman [16]. Modul ini menggunakan metode pengisian linear charging dengan kontrol arus dan tegangan konstan (CC-CV), yang umum digunakan dalam sistem pengisian baterai lithium. TP4056 dilengkapi dengan berbagai fitur proteksi seperti over-voltage, over-current, dan thermal protection, sehingga dapat mencegah kerusakan pada baterai akibat kondisi pengisian yang tidak normal. IC ini umumnya digunakan bersama dengan modul proteksi (protection circuit module) untuk menambah keamanan saat pengisian. Karena kemudahan implementasi, ukuran kecil, dan biaya rendah, TP4056 banyak digunakan dalam proyek elektronika berbasis mikrokontroler, alat portabel, serta sistem energi terbarukan skala kecil seperti panel surya atau generator mekanik.



Gambar 2. 5 TP24056

2.4. ESP-32

ESP32 adalah mikrokontroler yang memiliki modul Wi-Fi dan Bluetooth yang dapat digunakan untuk membuat sistem berbasis Internet of Things (IoT) [17]. ESP32 memiliki prosesor dual-core yang dapat menangani tugas yang memerlukan pemrosesan data cepat. ESP32 beroperasi dengan cara menerima input dari berbagai sensor melalui pin GPIO-nya, memproses data tersebut menggunakan program yang diunggah ke dalam memori, dan kemudian mengirimkan output ke perangkat lain atau ke cloud melalui koneksi nirkabel [18]. Dalam penelitian ini

penulis menggunakan ESP32 sebagai aplikasi monitoring daya keluaran piezoelektrik secara real-time.



Gambar 2. 6 ESP-32

2.5. INA226

Sensor INA226 adalah sensor digital berbasis I²C yang digunakan untuk memantau tegangan, arus, dan daya listrik secara real-time [19]. Sensor ini mampu mengukur tegangan, arus, dan menghitung daya secara langsung. INA226 bekerja dengan prinsip pengukuran tegangan diferensial di atas resistor shunt untuk menentukan arus yang mengalir melalui beban. INA226 dapat berfungsi dengan tegangan suplai antara 2,7 hingga 5,5 Volt dan membutuhkan arus suplai sebesar 330 μ A [18]. Kemudian, dengan membaca tegangan sistem secara langsung, INA226 dapat menghitung daya secara real time menggunakan rumus:

$$Daya (P) = Tegangan (V) \times Arus (I)$$

Sensor ini mampu mengukur tegangan hingga 36 V, dan tegangan shunt hingga ± 81.92 mV dengan resolusi tinggi 16-bit yang memungkinkan pembacaan arus minimal 25 μ A hingga 819,2mA.

2.6. Kapasitor

Kapasitor adalah komponen pasif yang berfungsi menyimpan energi dalam bentuk medan listrik. Dalam sistem elektronik, kapasitor banyak digunakan untuk penyaringan (filter), penyimpanan energi, dan penstabil tegangan [20].

$$Kapasitansi (C) = \frac{2 \times Energi (E)}{Tegangan^2 (V^2)}$$

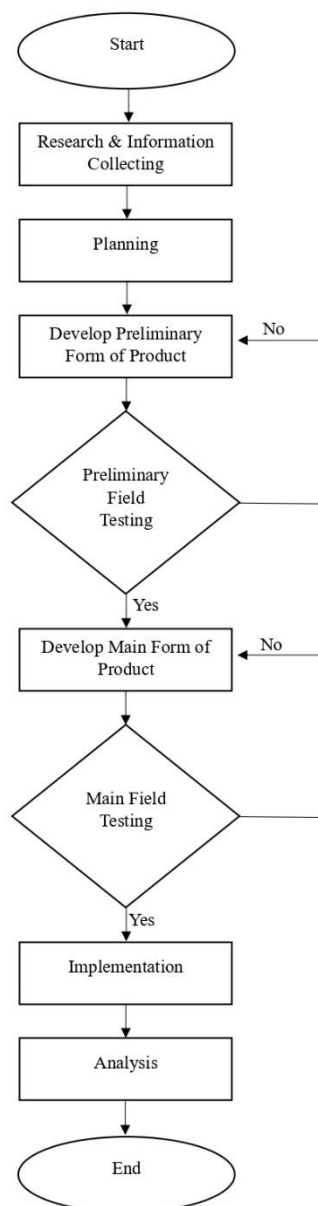
Nilai kapasitansi kapasitor ditentukan berdasarkan hasil bagi 2 kali energi dibagi kuadrat tegangan dalam konteks menentukan nilai kapasitansi berdasarkan energi dan tegangan kerja.



BAB III

METODE PELAKSANAAN

Dalam menyelesaikan Proyek Akhir yang berjudul Pembangkit Listrik Menggunakan Piezoelektrik Dengan Memanfaatkan Tekanan Kaki Manusia Pada Lantai, peneliti menggunakan metode *Research & Development* (R&D) dengan tahapan penyelesaian pada gambar diagram alir berikut (*gambar 3.1*).



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.1. Research & Information Collecting

Pada tahap awal ini, peneliti mengumpulkan informasi melalui studi literatur dan observasi untuk memahami potensi teknologi piezoelektrik dalam menghasilkan energi listrik dari tekanan. Studi literatur mencakup penelaahan terhadap jurnal ilmiah, artikel ilmiah, serta penelitian terdahulu yang berkaitan dengan konversi energi mekanik menjadi listrik menggunakan material piezoelektrik. Selain itu, peneliti juga melakukan observasi langsung di tempat-tempat dengan lalu lintas pejalan kaki tinggi untuk mengidentifikasi dan menentukan lokasi potensial penerapan teknologi ini secara optimal.

3.2. Planning

Setelah informasi awal terkumpul melalui studi literatur dan observasi langsung, tahap selanjutnya adalah merancang model awal sistem pembangkit listrik berbasis piezoelektrik. Pada tahap ini, peneliti merumuskan tujuan utama penelitian secara mendalam, membuat desain awal prototipe lantai piezoelektrik yang difokuskan pada struktur lantai piezoelektrik yang mampu menghasilkan energi listrik dari konversi energi mekanik dengan baik, serta menyusun instrumen penelitian yang akan digunakan dalam pengujian dan analisis data, termasuk pemilihan material piezoelektrik yang optimal, serta strategi sistem penyimpanan dan distribusi energi listrik yang andal.

3.3. Develop Preliminary Form of Product

Pada tahap ini, peneliti mulai membangun dan mengembangkan model awal dari lantai piezoelektrik yang berupa prototipe. Prototipe ini dibuat dalam skala kecil yang ditujukan untuk menguji kelayakan konsep dasar sistem. pengembangan dilakukan dalam skala kecil agar proses pengujian awal dapat lebih terkendali dan efisien dari segi biaya serta waktu.

3.4. Preliminary Field Testing

Setelah prototipe awal selesai dikembangkan, selanjutnya dilakukan pengujian dalam skala kecil. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi

efektivitas konversi energi mekanik menjadi listrik yang dihasilkan dari pijakan kaki manusia, menilai respons sistem terhadap tekanan kaki manusia dan daya tahan material yang digunakan. Umpan balik dari pengujian ini digunakan sebagai dasar perbaikan dan penyempurnaan desain utama.

3.5. Develop Main Form of Product

Berdasarkan hasil pengujian awal, peneliti melanjutkan ke tahap pengembangan bentuk utama produk pembangkit listrik berbasis piezoelektrik pada lantai. Pengembangan ini difokuskan pada peningkatan desain dan kinerja sistem secara keseluruhan agar lebih efisien dan siap untuk diuji dalam skala lebih besar. Pengembangan ini meliputi peningkatan material piezoelektrik, penambahan elemen desain mekanis yang mendukung, serta pengembangan program monitoring yang andal untuk mengetahui efisiensi energi yang dihasilkan secara *real-time*.

3.6. Main Field Testing

Pada tahap ini, sistem lantai piezoelektrik yang telah lengkap diuji dengan skala lebih besar guna mengevaluasi performa sistem secara keseluruhan. Pengujian dilakukan oleh peneliti dengan mempertimbangkan berbagai variabel seperti intensitas lalu lintas pejalan kaki, massa pejalan kaki, dan durasi penggunaan.

3.7. Implementation

Setelah uji coba dan penyempurnaan, peneliti mengimplementasikan produk pembangkit listrik berbasis piezoelektrik pada lantai pada proyek percontohan. Pada tahap ini, produk yang telah dikembangkan disimulasikan oleh penulis untuk diuji kelayakannya pada kondisi nyata dengan mempertimbangkan intensitas pejalan kaki yang tinggi untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal sekaligus mengetahui kemungkinan tantangan yang mungkin dalam penerapan teknologi.

3.8. Analysis

Tahap terakhir dalam penelitian ini adalah menganalisis hasil dari uji coba dan implementasi alat pembangkit listrik berbasis piezoelektrik pada lantai dengan

menilai efisiensi sistem dan kelayakannya sebagai alat pembangkit listrik untuk mendorong penggunaan energi terbarukan. Beberapa faktor yang dianalisis meliputi output energi yang dihasilkan selama periode penggunaan serta konsistensi performa sistem dalam berbagai kondisi lingkungan. Selain itu, dilakukan pula perbandingan antara hasil yang diperoleh dari implementasi di lapangan dengan data yang didapatkan dari pengujian sebelumnya. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk mengukur efektivitas energi yang dihasilkan, tetapi juga untuk menilai sejauh mana teknologi ini dapat diadopsi secara luas sebagai solusi energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.



BAB IV PEMBAHASAN

4.1. *Research & Colecting Information*

Pada tahap ini, peneliti melakukan pengumpulan data dan informasi untuk memperkuat pemahaman teknis dan praktis mengenai teknologi piezoelektrik. Kegiatan ini diawali dengan studi literatur, mencakup penelusuran berbagai jurnal ilmiah, artikel, serta laporan penelitian terdahulu yang membahas konversi energi mekanik menjadi energi listrik menggunakan material piezoelektrik.

Salah satu material piezoelektrik yang menjadi fokus utama adalah PZT (lead zirconate titanate), yang dikenal memiliki konstanta piezoelektrik lebih tinggi dibandingkan jenis lain seperti PVDF. Hal ini menjadikan PZT lebih efektif sebagai transduser energi, karena mampu menghasilkan output listrik yang lebih besar dalam respons terhadap tekanan mekanik [21].

Dalam salah satu penelitian yang membandingkan sumber energi mekanik seperti suara, tekanan, dan angin, ditemukan bahwa energi dari tekanan pijakan manusia menghasilkan tegangan dan arus tertinggi, yaitu 27,07 V dan 13,66 mA. Sebagai perbandingan, energi dari suara hanya menghasilkan 1,145 V dan 0,460 mA, sementara energi angin menghasilkan 0,53 V dan 0,04 mA. Hasil ini menunjukkan bahwa tekanan merupakan sumber energi mekanik paling potensial untuk dipanen menggunakan piezoelektrik [22].

Selain itu, berdasarkan artikel dari Beijing Ultrasonic, tegangan output dari piezoelektrik pada kondisi rangkaian terbuka (open circuit) dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut [14]:

$$Tegangan (V) = \frac{konstanta\ piezoelektrik\ (d) \times Gaya(F)}{Kapasitansi\ Piezoelektrik\ (C)}$$

Di mana:

V = tegangan output(V)

d = konstanta piezoelektrik (pC/N)

F = gaya mekanik yang diberikan (N)

C = kapasitansi piezoelektrik (F)

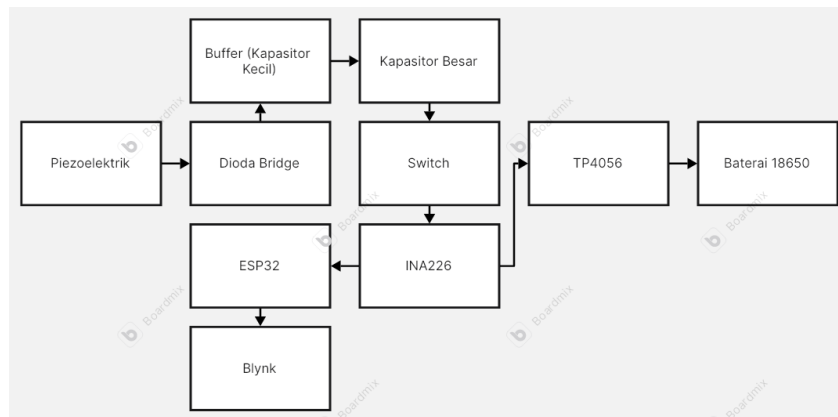
Penulis juga menelusuri jurnal ilmiah, artikel, dan datasheet untuk mengetahui nilai konstanta piezoelektrik dan kapasitansi dari material PZT yang digunakan. Berdasarkan sumber [21], jenis PZT memiliki konstanta piezoelektrik sebesar 289 pC/N dan kapasitansi sebesar 20 nF.

Dalam proses pengumpulan informasi, peneliti juga menemukan bahwa piezoelektrik sangat sensitif terhadap beban. Saat piezoelektrik langsung dihubungkan dengan beban seperti resistor atau kapasitor, tegangan output dapat langsung turun drastis akibat energi yang segera ditransfer ke beban. Oleh karena itu, penanganan khusus terhadap pemanenan energi piezoelektrik sangat diperlukan untuk mendapatkan hasil optimal [23].

Lebih lanjut, dalam studi [24] dijelaskan bahwa saat menggabungkan elemen piezoelektrik dalam konfigurasi seri atau paralel tanpa sistem penyearah (rectifier), dapat terjadi pembatalan muatan (charge cancellation), terutama jika elemen-elemen tersebut menerima tekanan yang tidak serempak (out of phase). Maka dari itu, penggunaan full bridge diode rectifier atau struktur penyearah lainnya sangat disarankan sebelum penyatuan output, untuk mencegah hilangnya energi dan memastikan output listrik tetap optimal.

4.2. Planning

Berdasarkan hasil studi literatur dan pemahaman terhadap karakteristik piezoelektrik, peneliti merancang sistem pemanen energi seperti yang ditunjukkan dalam blok diagram dan gambar berikut:



Gambar 4. 1 Blok Diagram Sistem

a. Piezoelektrik

Sebagai sumber utama, elemen piezoelektrik (PZT) dipilih karena memiliki konstanta piezoelektrik paling tinggi (289 pC/N), sehingga lebih efektif dalam menghasilkan tegangan listrik saat mendapat tekanan [21]. Energi yang dihasilkan bersifat AC dan memiliki tegangan tinggi tetapi arus rendah.

b. Dioda Bridge (Full Bridge Rectifier)

Komponen ini digunakan untuk menyearahkan sinyal AC dari piezoelektrik menjadi DC. Penambahan penyearah bertujuan menghindari pembatalan muatan akibat tekanan yang tidak serempak pada beberapa elemen piezoelektrik.

c. Filter (Kapasitor Kecil)

Setelah proses penyearahan, sinyal masih mengandung riak. Oleh karena itu, kapasitor kecil digunakan sebagai filter untuk menghaluskan sinyal DC agar lebih stabil sebelum disimpan.

d. Penyimpanasn Sementara (Kapasitor Besar)

Energi DC hasil filter disimpan terlebih dahulu dalam kapasitor besar sebagai penyimpanan sementara. Tujuannya untuk menstabilkan output dan menampung energi sebelum dikirim ke rangkaian selanjutnya.

e. Switch

Digunakan untuk mengatur kapan energi dari penyimpanan sementara dikirim ke tahap konversi. Switch berfungsi sebagai pengatur aliran energi agar efisien dan tidak terjadi lonjakan arus tiba-tiba.

e. INA226

Untuk mengukur arus dan tegangan output secara real-time, digunakan sensor INA226 yang mampu mengirimkan data secara digital ke mikrokontroler. Sensor ini memungkinkan pengawasan performa sistem secara presisi.

f. ESP32

Sebagai pusat kendali monitoring, ESP32 berfungsi membaca data dari INA226. Selain itu, ESP32 memiliki kemampuan komunikasi nirkabel, sehingga sistem dapat dikembangkan menjadi sistem IoT untuk pemantauan jarak jauh menggunakan aplikasi blynk.

g. Blynk

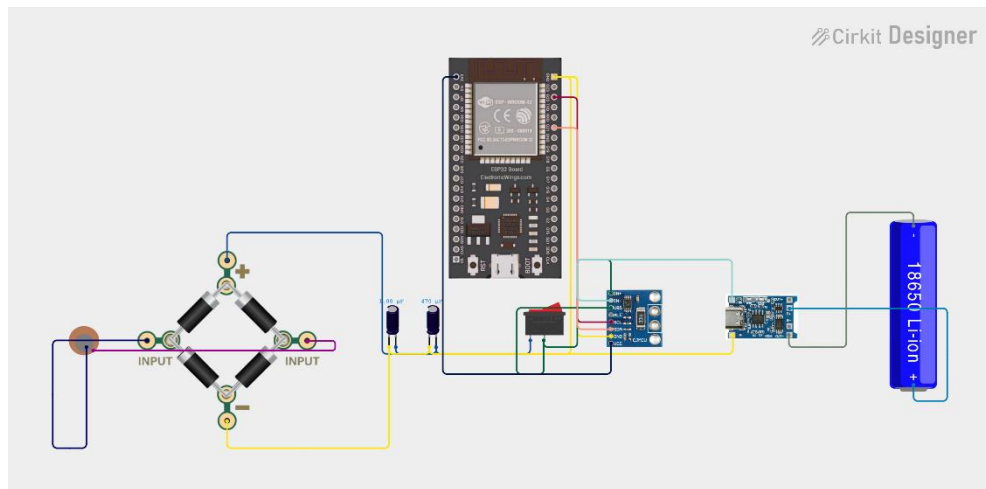
Sebagai antarmuka pengguna, digunakan aplikasi Blynk yang terhubung dengan ESP32 melalui Wi-Fi. Melalui Blynk, pengguna dapat memantau tegangan, arus, dan daya secara real-time melalui *smartphone*. Ini memberikan kemudahan dalam evaluasi performa sistem secara jarak jauh.

h. TP4056

Karena tegangan dari piezoelektrik tidak konstan, digunakan TP4056 untuk mengatur output agar sesuai untuk mengisi baterai 18650. Konverter ini mampu menaikkan (boost) atau menurunkan (buck) tegangan sesuai kebutuhan.

i. Baterai 18650

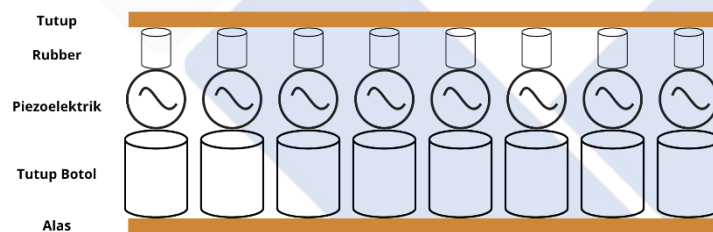
Output akhir dari sistem ini digunakan untuk mengisi baterai 18650. Baterai berfungsi sebagai penyimpanan energi jangka panjang yang dapat digunakan untuk kebutuhan beban selanjutnya.



Gambar 4. 2 Wiring Sistem

4.3 Develop Preliminary Form of Product

Pada tahap ini, penulis melakukan pengembangan awal produk dalam bentuk prototipe skala kecil untuk mengevaluasi konfigurasi dan struktur penyusunan elemen piezoelektrik. Tujuan utama dari tahap ini bukanlah untuk menghasilkan sistem pemanen energi secara utuh, melainkan untuk mencari struktur piezoelektrik yang paling efisien dalam menghasilkan tegangan dalam



Gambar 4. 3 Struktur Pemanen Energi Piezoelektrik

rangkaian terbuka dengan target efisiensi di atas 70% berdasarkan rumus tegangan output piezoelektrik dalam rangkaian terbuka.

Untuk mendukung proses uji coba, peneliti merancang wadah mekanik sederhana menggunakan tutup botol yang telah dimodifikasi dengan lubang di bagian tengah sebagai media penempatan elemen piezoelektrik. Lubang ini berfungsi untuk memberikan ruang lengkung pada piezoelektrik saat diberikan tekanan. Dalam desain ini, digunakan material elastis dan padat (rubber) yang

diposisikan di atas elemen piezoelektrik guna membantu memusatkan tekanan ke area tengah, khususnya pada bagian keramik, yang merupakan area paling sensitif terhadap gaya mekanik.

Pendekatan ini didasarkan pada prinsip bahwa elemen piezoelektrik dapat menghasilkan keluaran daya yang lebih optimal apabila mengalami sedikit lengkungan saat diberi tekanan. Selain berfungsi sebagai media distribusi tekanan, penggunaan rubber juga dimaksudkan untuk melindungi titik sambungan kabel (hasil solder) pada permukaan piezoelektrik. Dengan demikian, tekanan tidak langsung mengenai area sambungan, sehingga risiko kerusakan pada lapisan keramik akibat tekanan berulang dapat diminimalkan. Perlindungan ini penting untuk menjaga keandalan piezoelektrik dalam menghasilkan output tegangan yang stabil dan maksimal.

4.4. Preliminary Field Testing

Setelah tahapan pengembangan awal prototipe skala kecil berhasil diselesaikan, penulis melanjutkan dengan uji lapangan awal (*preliminary field testing*) guna mengevaluasi efisiensi struktur dan konfigurasi elemen piezoelektrik yang telah dirancang. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk menilai kelayakan teknis prototipe berdasarkan performa tegangan dan arus output yang dihasilkan, serta untuk mengonfirmasi konfigurasi terbaik dari 4 kombinasi konfigurasi (seri-seri, parallel-parallel, seri-parallel, parallel-seri). Hasil pengukuran tegangan dan arus pada percobaan 1 seri-seri dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Percobaan 1 Rangkaian Seri-Seri (16 seri dan 16 seri) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Percobaan 1 (Seri-Seri)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	39,3	7,19
2	60,9	8,82
3	38,1	8,66
4	60,7	6,75
5	63,8	3,55
6	49,2	5,47
7	39,5	3,38
8	53,1	2,73

9	61,7	4,81
10	80,4	2,91
Rata-Rata	54,67	5,427



Gambar 4. 4 Pengujian 1 Konfigurasi Seri-Seri Pengukuran Tegangan



Gambar 4. 5 Pengujian 1 Konfigurasi Seri-Seri Pengukuran Arus

Tabel 4.1 menunjukkan hasil pengukuran tegangan dan arus pada percobaan pertama dengan konfigurasi rangkaian seri-seri, yaitu dua kelompok piezoelektrik yang masing-masing terdiri dari 16 elemen disusun secara seri dan kemudian digabung juga secara seri. Pengujian dilakukan dengan memberikan tekanan menggunakan massa sebesar 22 kg dan beban resistif sebesar 1 ohm untuk mengukur arus. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan bervariasi antara 38,1 V hingga 80,4 V, dengan rata-rata sebesar 54,67 V. Sementara itu, arus yang dihasilkan berkisar antara 2,73 mA hingga 8,82 mA, dengan rata-rata 5,427 mA. Nilai tegangan yang cukup tinggi ini menunjukkan bahwa konfigurasi seri-seri efektif dalam menghasilkan output tegangan yang besar, sesuai dengan karakteristik rangkaian seri yang menjumlahkan tegangan antar elemen. Namun

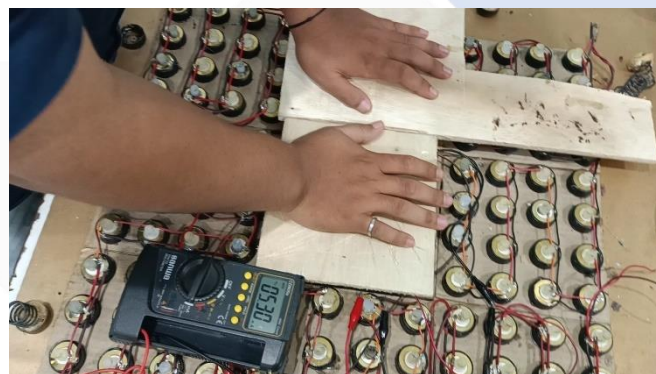
demikian, nilai arus yang cenderung rendah dan tidak stabil mengindikasikan keterbatasan dalam suplai arus, yang juga merupakan sifat umum dari konfigurasi seri. Setelah percobaan ini dilakukan percobaan berulang sebanyak 3 kali untuk masing masing konfigurasi, berikut percobaan 2 untuk konfigurasi seri-seri.

Tabel 4. 2 Percobaan 2 Rangkaian Seri-Seri (16 seri dan 16 seri) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Percobaan 2 (Seri-Seri)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	103,5	5,3
2	53,3	3,52
3	104	2,26
4	68,3	7,82
5	65	2,37
6	77	3,58
7	53,4	3,87
8	59,2	4,92
9	56,8	4,56
10	46,1	2,45
Rata-Rata	68,66	4,065



Gambar 4. 6 Pengujian 2 Konfigurasi Seri-Seri
Pengukuran Tegangan



Gambar 4. 7 Pengujian 2 Konfigurasi Seri-Seri
Pengukuran Arus

Tabel 4.2 menyajikan hasil pengukuran pada percobaan kedua dengan konfigurasi rangkaian seri-seri, menggunakan susunan yang sama seperti percobaan pertama yaitu 16 elemen piezoelektrik disusun secara seri dan digabung dengan 16 elemen lainnya yang juga disusun seri. Tekanan diberikan menggunakan massa 22 kg dan beban resistif 1 ohm, dengan fokus pada pengukuran tegangan dan arus keluaran. Tegangan yang dihasilkan bervariasi cukup signifikan, mulai dari 46,1 V hingga mencapai 104 V, dengan nilai rata-rata sebesar 68,66 V. Sementara itu, arus yang terukur berada dalam rentang 2,26 mA hingga 7,82 mA, dengan rata-rata 4,065 mA. Meskipun konfigurasi ini tetap menunjukkan kemampuan menghasilkan tegangan tinggi seperti pada percobaan pertama, terdapat penurunan rata-rata arus keluaran. Fluktuasi nilai yang cukup besar pada tegangan dan arus

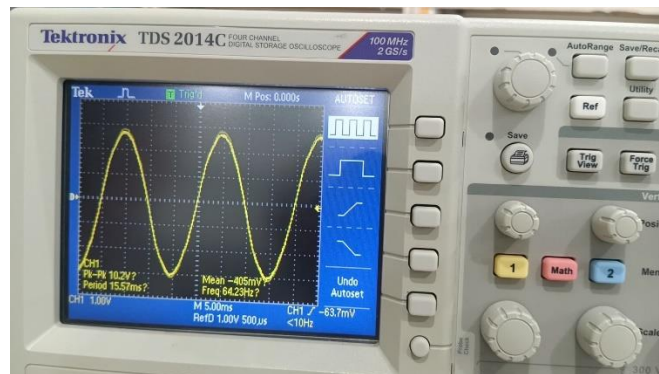
mengindikasikan bahwa respons sistem terhadap tekanan masih belum sepenuhnya konsisten, kemungkinan disebabkan oleh ketidakseimbangan distribusi gaya atau karakteristik individu elemen piezoelektrik. Hasil percobaan ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa konfigurasi seri-seri unggul dalam menghasilkan tegangan tinggi, tetapi kurang stabil dan efisien dalam hal arus output. Selain itu hasil ini juga akan diperkuat pada percobaan 3 untuk performa konfigurasi seri-seri yang ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Percobaan 3 Rangkaian Seri-Seri (16 seri dan 16 seri) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Percobaan 3 (Seri-Seri)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	72,9	3,32
2	84,2	4,52
3	60	7,46
4	55,3	2,55
5	42	3,6
6	56,1	5,22
7	71,7	5,15
8	29,1	4,44
9	48,9	7,64
10	68,7	3,38
Rata-Rata	58,89	4,728



Gambar 4. 8 Pengujian 3 Konfigurasi Seri-Seri Pengukuran Tegangan



Gambar 4. 9 Grafik Pengujian Osiloskop Sinyal Keluaran Dari Konfigurasi seri-seri Sistem



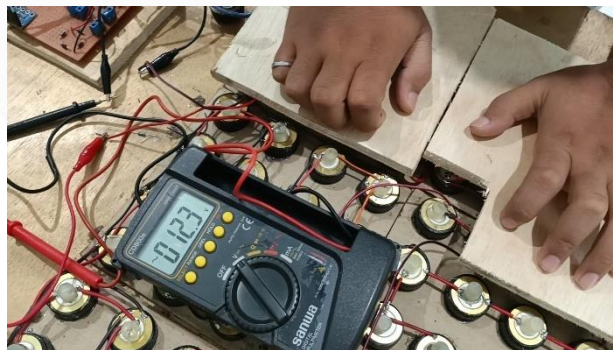
Gambar 4. 10 Pengujian 3 Konfigurasi Seri-Seri Pengukuran Arus

Tabel 4.3 menampilkan hasil pengujian pada percobaan ketiga dengan konfigurasi rangkaian seri-seri, menggunakan 16 elemen piezoelektrik yang disusun seri dan digabungkan dengan 16 elemen lainnya dalam konfigurasi serupa. Seperti pada dua percobaan sebelumnya, tekanan diberikan menggunakan massa sebesar 22 kg dan pengukuran arus dilakukan dengan beban resistif sebesar 1 ohm. Tegangan yang dihasilkan pada percobaan ini berkisar antara 29,1 V hingga 84,2 V, dengan nilai rata-rata sebesar 58,89 V. Sementara itu, arus yang dihasilkan berada dalam rentang 2,55 mA hingga 7,64 mA, dengan rata-rata 4,728 mA. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi seri-seri tetap mampu menghasilkan tegangan yang relatif tinggi, meskipun terdapat variasi yang cukup besar antar tekanan. Nilai arus cenderung lebih stabil dibandingkan percobaan kedua, namun tetap menunjukkan fluktuasi yang mencerminkan ketidakkonsistenan respons elemen piezoelektrik terhadap tekanan. Dengan demikian, percobaan ketiga ini kembali menegaskan karakteristik konfigurasi seri-seri yang efektif dalam meningkatkan

tegangan, tetapi menunjukkan keterbatasan dalam hal kestabilan dan efisiensi arus output. Setelah melakukan pengujian performa rangkaian seri-seri selanjutnya penulis menguji performa rangkaian parallel-parallel pada tabel 4.4.

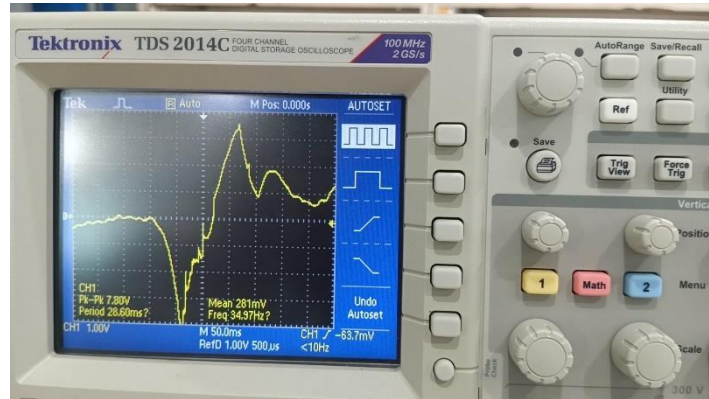
Tabel 4. 4 Percobaan 1 Rangkaian Paralel-Paralel (16 paralel dan 16 paralel) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Percobaan 1 (Paralel-Paralel)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	8,2	6,8
2	9,7	9,3
3	9,2	12,5
4	12,3	9,6
5	10,2	6,6
6	6,3	7,4
7	11,2	9,5
8	4,3	15,1
9	10,5	14,6
10	4,9	15,1
Rata-Rata	8,68	10,65



Gambar 4. 11 Pengujian 1 Konfigurasi Paralel-Paralel Pengukuran Tegangan

Selain pengujian ini dilihat juga hasil sinyal keluaran dari konfigurasi paralel-paralel menggunakan osiloskop yang dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4. 13 Grafik Pengujian Osiloskop Sinyal Keluaran Dari Konfigurasi Paralel-Paralel Sistem



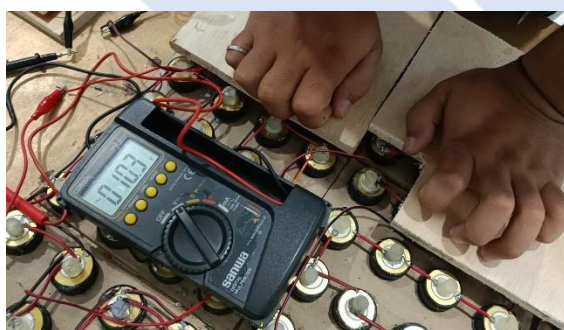
Gambar 4. 12 Pengujian 1 Konfigurasi Paralel-Paralel Pengukuran Arus

Tabel 4.4 menunjukkan hasil pengujian pada percobaan pertama dengan konfigurasi rangkaian paralel-paralel, di mana 16 elemen piezoelektrik disusun secara paralel dan digabung dengan 16 elemen lainnya yang juga disusun paralel. Percobaan ini dilakukan menggunakan tekanan dari massa sebesar 22 kg dan beban resistif 1 ohm untuk pengukuran arus keluaran. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan relatif rendah, berkisar antara 4,3 V hingga 12,3 V, dengan rata-rata sebesar 8,68 V. Sebaliknya, arus yang dihasilkan cenderung tinggi, mulai dari 6,6 mA hingga 15,1 mA, dengan rata-rata mencapai 10,65 mA. Hasil ini mencerminkan karakteristik khas dari konfigurasi paralel, yaitu menghasilkan arus besar namun tegangan rendah, karena pada rangkaian paralel arus total merupakan penjumlahan dari arus masing-masing elemen, sementara

tegangan tetap. Meskipun nilai tegangannya lebih kecil dibandingkan konfigurasi seri-seri, konfigurasi ini menunjukkan keunggulan dalam suplai arus, yang dapat menjadi lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan daya stabil dengan arus besar. Secara keseluruhan, percobaan ini mengonfirmasi bahwa konfigurasi paralel-paralel lebih unggul dari sisi arus output, namun terbatas dalam hal tegangan. Setelah pengujian pertama, dilanjutkan pengujian kedua performa rangkian paralel-paralel pada tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Percobaan 2 Rangkaian Paralel-Paralel (16 paralel dan 16 paralel) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Percobaan 2 (Paralel-Paralel)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	2	3,8
2	3	9,4
3	7,4	10,9
4	8,6	9,7
5	10,3	14,9
6	8,4	9,3
7	8,7	9,3
8	5,4	8,4
9	5,4	10,7
10	9,4	9,4
Rata-Rata	6,86	9,58



Gambar 4. 14 Pengujian 2 Konfigurasi Paralel-Paralel Pengukuran Tegangan



Gambar 4. 15 Pengujian 2 Konfigurasi Paralel-Paralel Pengukuran Arus

Tabel 4.5 menyajikan hasil pengujian percobaan kedua pada konfigurasi rangkaian paralel-paralel, di mana 16 elemen piezoelektrik disusun secara paralel dan digabung dengan 16 elemen lainnya yang juga disusun paralel. Percobaan dilakukan dengan tekanan dari massa sebesar 22 kg dan beban resistif 1 ohm untuk mengukur arus keluaran. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan bervariasi dari 2 V hingga 10,3 V, dengan rata-rata sebesar 6,86 V. Sementara itu, arus yang dihasilkan berkisar antara 3,8 mA hingga 14,9 mA, dengan rata-rata mencapai 9,58 mA. Meskipun nilai tegangannya relatif rendah, hasil ini konsisten dengan karakteristik konfigurasi paralel yang memang dirancang untuk menghasilkan arus tinggi. Arus keluaran pada percobaan ini cukup stabil dan cenderung tinggi, memperkuat keunggulan konfigurasi paralel-paralel dalam menyuplai arus besar. Performa ini menjadikannya lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kestabilan arus meskipun pada tegangan rendah. Secara umum, percobaan kedua ini menguatkan temuan pada percobaan sebelumnya bahwa konfigurasi paralel-paralel efektif dalam memaksimalkan arus output, namun kurang ideal dalam menghasilkan tegangan tinggi. Selanjutnya percobaan ketiga untuk menguatkan temuan ini dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Percobaan 3 Rangkaian Paralel-Paralel (16 paralel dan 16 paralel) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Percobaan 3 (Paralel-Paralel)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	10,7	8,4
2	6,6	9,8

3	6,2	8,6
4	12,4	9,3
5	5,5	8,3
6	10,2	14,5
7	10,3	16,2
8	12,1	17,2
9	9	14,9
10	15,2	15,4
Rata-Rata	9,82	12,26



Gambar 4. 16 Pengujian 3 Konfigurasi Paralel-Paralel Pengukuran Tegangan



Gambar 4. 17 Pengujian 3 Konfigurasi Paralel-Paralel Pengukuran Arus

Tabel 4.6 menunjukkan hasil percobaan ketiga dengan konfigurasi rangkaian paralel-paralel, yaitu dua kelompok yang masing-masing terdiri dari 16 elemen piezoelektrik disusun secara paralel dan digabungkan secara paralel pula. Seperti pada percobaan sebelumnya, pengujian dilakukan dengan menggunakan massa 22 kg dan beban 1 ohm untuk mengukur arus keluaran. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan berada dalam kisaran 5,5 V hingga 15,2 V, dengan nilai rata-rata sebesar 9,82 V. Sementara itu, arus yang dihasilkan berkisar antara 8,3 mA hingga 17,2 mA, dengan rata-rata mencapai 12,26 mA.

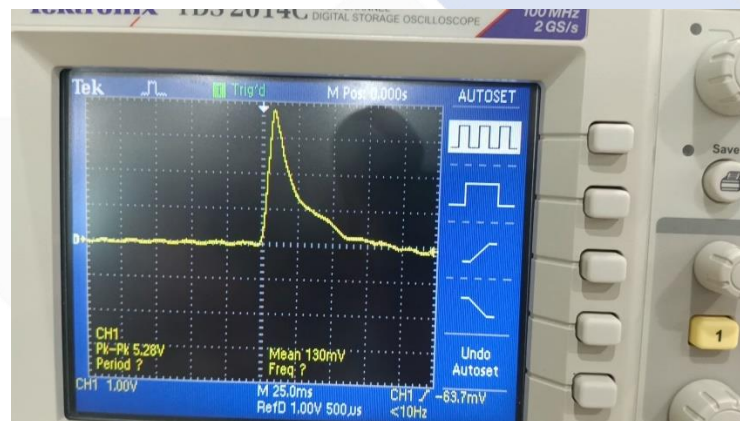
Dibandingkan dua percobaan sebelumnya dalam konfigurasi yang sama, percobaan ketiga ini menghasilkan rata-rata tegangan dan arus yang lebih tinggi, menunjukkan performa yang lebih optimal. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi paralel-paralel memang sangat efektif dalam menghasilkan arus besar, sebagaimana tercermin dari nilai rata-rata arus yang meningkat secara signifikan. Tegangan yang tetap rendah namun cukup stabil juga sesuai dengan karakteristik khas rangkaian paralel. Dengan demikian, percobaan ini memperkuat kesimpulan bahwa konfigurasi paralel-paralel unggul dalam hal keluaran arus dan lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan suplai arus tinggi dengan tegangan moderat. Setelah pengujian performa seri-seri dan paralel-paralel, dilanjutkan pengujian untuk menilai konfigurasi yang lain yaitu seri-paralel yang dapat dilihat pada tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Percobaan 1 Rangkaian Seri-Paralel (16 Seri dan 16 paralel) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Percobaan 1 (Seri-Paralel)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	8,2	0,41
2	6,2	1,24
3	3,9	1,07
4	4,8	1,26
5	11,4	1,64
6	5,5	1,71
7	10,9	1,48
8	13,9	1,51
9	5,5	1
10	12,9	0,96
Rata-Rata	8,32	1,228



Gambar 4. 18 Pengujian 1 Konfigurasi Seri-Paralel Pengukuran Tegangan



Gambar 4. 19 Grafik Pengujian Osiloskop Sinyal Keluaran Dari Konfigurasi Seri-Paralel Sistem



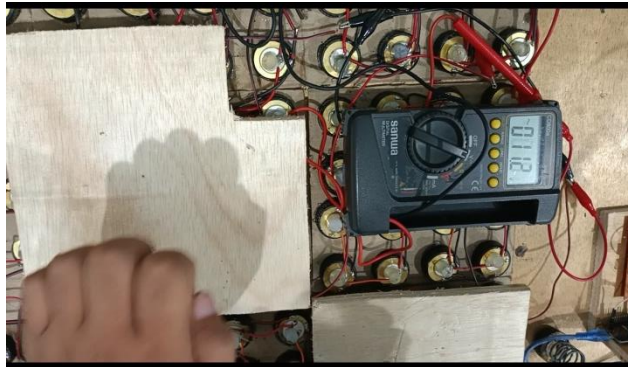
Gambar 4. 20 Pengujian 1 Konfigurasi Seri-Paralel Pengukuran Arus

Tabel 4.7 menyajikan hasil percobaan pertama dengan konfigurasi rangkaian seri-paralel, yaitu gabungan antara 16 elemen piezoelektrik yang disusun secara seri dan 16 elemen lainnya yang disusun secara paralel. Percobaan dilakukan

dengan memberikan tekanan menggunakan massa 22 kg dan beban resistif 1 ohm untuk mengukur arus keluaran. Tegangan yang dihasilkan dalam percobaan ini berkisar antara 3,9 V hingga 13,9 V, dengan nilai rata-rata sebesar 8,32 V. Sementara itu, arus yang dihasilkan cukup rendah, berada dalam rentang 0,41 mA hingga 1,71 mA, dengan rata-rata sebesar 1,228 mA. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi seri-paralel menghasilkan tegangan yang relatif sedang, namun dengan arus yang rendah dan cenderung stabil. Kombinasi ini tampaknya belum optimal baik dalam hal tegangan tinggi seperti pada konfigurasi seri-seri maupun dalam menghasilkan arus besar seperti pada konfigurasi paralel-paralel. Oleh karena itu, konfigurasi ini mungkin kurang efisien untuk aplikasi yang memerlukan daya tinggi atau kestabilan arus. Setelah ini dilakukan pengujian berulang untuk memastikan performa konfigurasi seri-paralel yang dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Percobaan 2 Rangkaian Seri-Paralel (16 Seri dan 16 paralel) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Percobaan 2 (Seri-Paralel)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	8,4	1,31
2	4,6	1,75
3	10,8	1,1
4	8,3	1,01
5	7,2	1,19
6	11,2	0,71
7	3,5	0,64
8	10,2	1,64
9	10,5	1,72
10	9,5	1,38
Rata-Rata	8,42	1,245



Gambar 4. 21 Pengujian 2 Konfigurasi Seri-Paralel Pengukuran Tegangan



Gambar 4. 22 Pengujian 2 Konfigurasi Seri-Paralel Pengukuran Arus

Tabel 4.8 menunjukkan hasil pengujian pada percobaan kedua dengan konfigurasi rangkaian seri-paralel, yaitu gabungan antara 16 elemen piezoelektrik yang disusun secara seri dengan 16 elemen lainnya yang disusun paralel. Pengujian dilakukan menggunakan tekanan dari massa sebesar 22 kg dan beban resistif 1 ohm untuk mengukur arus output. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan berada dalam rentang 3,5 V hingga 11,2 V, dengan nilai rata-rata sebesar 8,42 V. Sementara itu, arus yang dihasilkan bervariasi antara 0,64 mA hingga 1,75 mA, dengan rata-rata sebesar 1,245 mA. Nilai tegangan yang diperoleh tergolong sedang dan relatif stabil, sedangkan arus keluaran masih rendah, mirip dengan hasil pada percobaan pertama. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi seri-paralel memberikan kompromi antara tegangan dan arus, namun belum mampu menghasilkan kinerja optimal pada salah satu aspek tersebut. Dengan demikian, percobaan ini menegaskan bahwa konfigurasi seri-paralel mungkin tidak seefisien konfigurasi murni seri atau paralel, terutama dalam konteks pemanfaatan energi

piezoelektrik untuk menghasilkan daya yang cukup besar secara konsisten. Selanjutnya untuk memastikan performa sistem dilakukan pengujian ketiga untuk konfigurasi ini yang dapat dilihat pada tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Percobaan 3 Rangkaian Seri-Paralel (16 Seri dan 16 paralel) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Percobaan 3 (Seri-Paralel)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	9,1	1,21
2	6,6	0,83
3	7,9	1,9
4	4,9	1,6
5	9	0,94
6	2,6	1,16
7	4,5	0,87
8	8,8	0,76
9	7,5	1,9
10	6,2	1,1
Rata-Rata	6,71	1,229



Gambar 4. 23 Pengujian 3 Konfigurasi Seri-Paralel Pengukuran Tegangan



Gambar 4. 24 Pengujian 3 Konfigurasi Seri-Paralel Pengukuran Arus

Tabel 4.9 menyajikan hasil percobaan ketiga dengan konfigurasi rangkaian seri-paralel, yaitu kombinasi 16 elemen piezoelektrik yang disusun seri dan 16 lainnya secara paralel, menggunakan massa 22 kg dan beban resistif 1 ohm untuk mengukur keluaran arus. Tegangan yang dihasilkan dalam percobaan ini bervariasi antara 2,6 V hingga 9,1 V, dengan nilai rata-rata sebesar 6,71 V. Arus yang dihasilkan berada dalam kisaran 0,76 mA hingga 1,9 mA, dan rata-rata sebesar 1,229 mA. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi seri-paralel menghasilkan tegangan yang moderat dengan arus keluaran yang tetap rendah, serupa dengan dua percobaan sebelumnya. Nilai arus yang cenderung stabil namun kecil menunjukkan bahwa konfigurasi ini masih belum mampu memberikan efisiensi optimal baik dalam aspek tegangan maupun arus. Performa sistem yang cenderung sedang ke rendah dalam kedua parameter mengindikasikan bahwa seri-paralel bukanlah konfigurasi yang paling efektif untuk pemanenan energi piezoelektrik dalam skenario uji coba ini. Oleh karena itu, hasil dari percobaan ini semakin memperkuat kesimpulan bahwa konfigurasi seri-paralel memiliki keterbatasan dalam menghasilkan output daya yang signifikan. Setelah pengujian tiga kombinasi konfigurasi dilakukan pengujian untuk konfigurasi terakhir yaitu paralel-seri yang dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Percobaan 1 Rangkaian Paralel-Seri (16 Paralel dan 16 Seri) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Percobaan 1 (Paralel-Seri)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	5,7	0,07
2	7,1	0,05
3	2,8	1,23
4	4,1	1,24
5	4,4	0,9
6	4,8	0,66
7	6,1	0,83
8	7,6	0,63
9	3	0,66
10	6	0,65
Rata-Rata	5,16	0,692

rata-rata hanya 0,692 mA. Nilai arus ini tergolong rendah, bahkan dibandingkan dengan konfigurasi seri-paralel yang sebelumnya diuji. Fluktuasi besar pada arus, seperti terlihat pada tekanan ke-3 dan ke-4, mengindikasikan ketidakstabilan dalam performa output. Secara keseluruhan, konfigurasi paralel-seri dalam percobaan ini menunjukkan performa yang cukup terbatas, baik dari sisi tegangan maupun arus. Hal ini menunjukkan bahwa susunan paralel-seri mungkin tidak ideal untuk optimalisasi output daya pada sistem piezoelektrik, terutama ketika digunakan dalam kondisi beban dan tekanan seperti pada pengujian ini. Setelah ini dilakukan pengujian berulang untuk memastikan performa konfigurasi ini yang dapat dilihat pada tabel 4.11.

\Tabel 4. 11 Percobaan 2 Rangkaian Paralel-Seri (16 Paralel dan 16 Seri) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Percobaan 2 (Paralel-Seri)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	5	0,04
2	1,9	0,24
3	6,1	0,35
4	6,6	0,35
5	2,7	0,34
6	4,9	1,37
7	1,3	1,41
8	1,6	1,42
9	2,3	1,12
10	1,7	0,9
Rata-Rata	3,41	0,754



Gambar 4. 28 Pengujian 2 Konfigurasi Paralel-Seri Pengukuran Tegangan



Gambar 4. 29 Pengujian 2 Konfigurasi Paralel-Seri Pengukuran Arus

Tabel 4.11 menyajikan hasil percobaan kedua dengan konfigurasi rangkaian paralel-seri, yaitu gabungan dari 16 elemen piezoelektrik yang disusun paralel dan 16 lainnya secara seri. Pengujian dilakukan dengan menggunakan beban resistif 1 ohm dan tekanan dari massa sebesar 22 kg untuk mengukur output arus dan tegangan. Hasil menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan cukup rendah, berkisar antara 1,3 V hingga 6,6 V, dengan rata-rata hanya sebesar 3,41 V. Sementara itu, arus keluaran juga tergolong kecil namun sedikit lebih bervariasi, dengan rentang antara 0,04 mA hingga 1,42 mA dan rata-rata sebesar 0,754 mA.

Dari hasil ini terlihat bahwa konfigurasi paralel-seri pada percobaan kedua menghasilkan performa yang tidak konsisten. Tegangan dan arus yang dihasilkan cenderung rendah dan kurang stabil, bahkan lebih rendah dibandingkan konfigurasi seri-paralel pada percobaan sebelumnya. Beberapa titik tekanan menunjukkan arus yang relatif tinggi meskipun tegangannya sangat kecil, yang dapat mengindikasikan ketidakseimbangan dalam distribusi beban antar elemen piezoelektrik. Secara keseluruhan, percobaan ini menunjukkan bahwa konfigurasi paralel-seri kurang optimal untuk menghasilkan daya yang memadai, sehingga kurang direkomendasikan untuk aplikasi pemanenan energi yang mengandalkan efisiensi output baik dari sisi tegangan maupun arus. Setelah pengujian kedua ini, dilakukan pengujian terakhir untuk mengonfirmasi performa konfigurasi parallel-seri yang dapat dilihat pada tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Percobaan 3 Rangkaian Paralel-Seri (16 Paralel dan 16 Seri) menggunakan massa 22kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Percobaan 3 (Paralel-Seri)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	6,6	0,85
2	2,5	0,85
3	3	0,76
4	5,7	1,11
5	2	0,97
6	5,7	0,98
7	1,7	0,75
8	5,4	1,04
9	6,4	0,71
10	2,7	1,18
Rata-Rata	4,17	0,92



Gambar 4. 30 Pengujian 3 Konfigurasi Paralel-Seri Pengukuran Tegangan

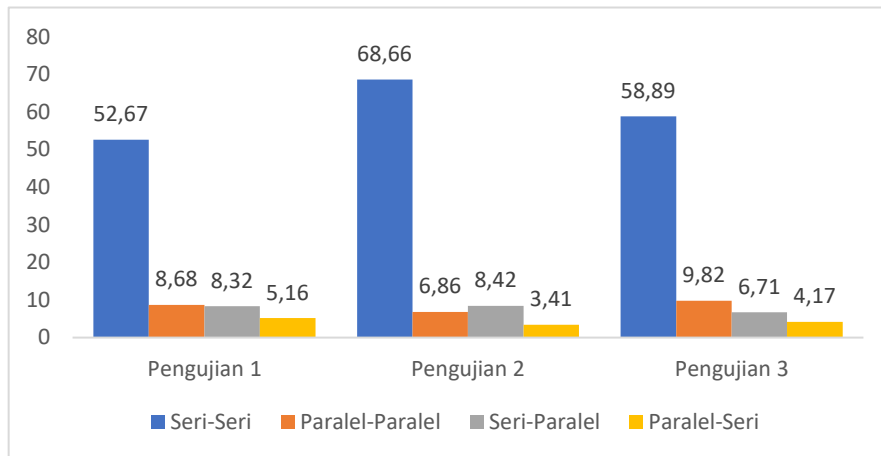


Gambar 4. 31 Pengujian 3 Konfigurasi Paralel-Seri Pengukuran Arus

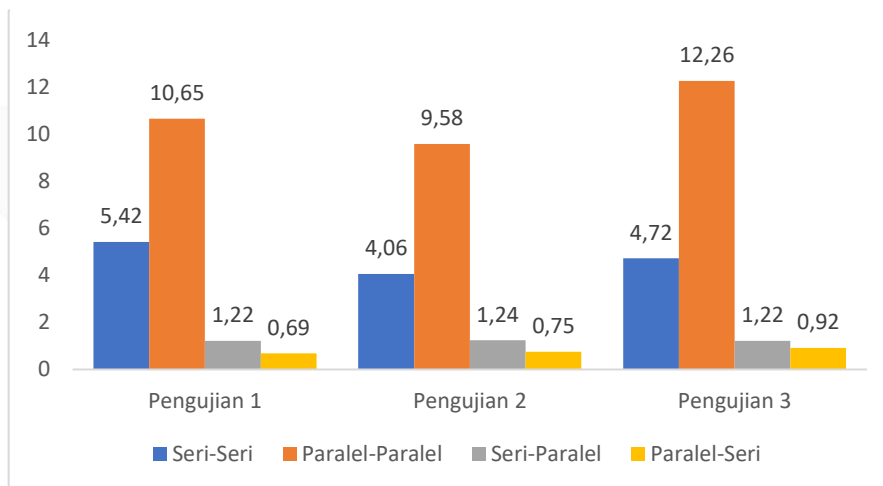
Tabel 4.12 menampilkan hasil percobaan ketiga dengan konfigurasi rangkaian paralel-seri, yaitu 16 elemen piezoelektrik yang disusun paralel dan 16 lainnya secara seri. Dalam percobaan ini, massa sebesar 22 kg digunakan sebagai sumber tekanan, dengan beban resistif 1 ohm untuk mengukur tegangan dan arus

output. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan berkisar antara 1,7 V hingga 6,6 V, dengan nilai rata-rata sebesar 4,17 V. Sementara itu, arus yang dihasilkan bervariasi dari 0,71 mA hingga 1,18 mA, dengan rata-rata sebesar 0,92 mA.

Dibandingkan dua percobaan sebelumnya dengan konfigurasi yang sama, percobaan ketiga ini menunjukkan sedikit peningkatan baik pada rata-rata tegangan maupun arus. Meski demikian, performa keseluruhan masih tergolong rendah. Tegangan yang dihasilkan tetap berada pada kisaran rendah hingga sedang, dan arus yang dihasilkan pun masih di bawah 2 mA. Pola fluktuasi arus dan tegangan dari setiap tekanan juga menunjukkan bahwa konfigurasi paralel-seri cenderung tidak stabil dan tidak konsisten dalam menghasilkan output energi. Dengan demikian, meskipun terdapat sedikit perbaikan dibandingkan percobaan sebelumnya, hasil ini tetap mengindikasikan bahwa konfigurasi paralel-seri kurang efektif dalam menghasilkan daya listrik secara optimal. Konfigurasi ini cenderung menghasilkan output yang lemah dari sisi tegangan maupun arus, menjadikannya pilihan yang kurang efisien untuk sistem pemanenan energi piezoelektrik dengan kebutuhan daya yang lebih tinggi. Berikut merupakan grafik perbandingan tegangan dan arus antara 4 kombinasi konfigurasi.



Gambar 4. 33 Grafik Perbandingan Tegangan (V) 4 Kombinasi Konfigurasi



Gambar 4. 32 Grafik Perbandingan Arus (mA) 4 Kombinasi Konfigurasi

Berdasarkan rangkaian percobaan yang telah dilakukan terhadap empat konfigurasi susunan elemen piezoelektrik yaitu seri-seri, paralel-paralel, seri-paralel, dan paralel-seri dapat disimpulkan bahwa setiap konfigurasi memiliki karakteristik performa yang berbeda dalam menghasilkan tegangan dan arus listrik. Konfigurasi seri-seri terbukti paling unggul dalam menghasilkan tegangan tertinggi, meskipun arus yang dihasilkan relatif sedang. Sebaliknya, konfigurasi paralel-paralel menunjukkan kemampuan menghasilkan arus yang lebih besar, namun dengan tegangan yang rendah. Sementara itu, konfigurasi seri-paralel dan paralel-seri cenderung menghasilkan tegangan dan arus yang lebih rendah dan tidak

stabil, menunjukkan performa yang kurang optimal dibandingkan dua konfigurasi sebelumnya.

Secara umum, untuk aplikasi pemanenan energi piezoelektrik yang membutuhkan output tegangan tinggi, konfigurasi seri-seri menjadi pilihan yang paling efektif. Di sisi lain, jika aplikasi lebih menekankan pada arus tinggi, maka konfigurasi paralel-paralel dapat dipertimbangkan, meskipun kompromi terhadap tegangan perlu diperhitungkan. Dua konfigurasi gabungan (seri-paralel dan paralel-seri) tampaknya belum memberikan keunggulan berarti dan kurang efisien untuk aplikasi praktis. Oleh karena itu, fokus pengembangan lebih lanjut sebaiknya diarahkan pada optimalisasi konfigurasi seri-seri atau paralel-paralel sesuai kebutuhan sistem dan karakteristik beban yang digunakan..

4.5. Develop Main Form of Product

Berdasarkan hasil pengujian pada tahap Preliminary Field Testing, penulis memperoleh kesimpulan keefektifan sistem piezoelektrik yang telah diuji merupakan rangkaian murni seri-seri atau paralel-paralel. Namun karena aplikasi konfigurasi ini ingin digunakan untuk mengecas sebuah baterai, dipilih rangkaian murni paralel-paralel dikarenakan arus yang lebih baik daripada seri-seri. Nilai ini menjadi dasar untuk melanjutkan pengembangan ke bentuk produk utama, dengan tujuan meningkatkan skala dan kestabilan performa sistem konversi energi berbasis piezoelektrik. Pada tahap ini, jumlah elemen piezoelektrik ditingkatkan dan dikonfigurasi dalam struktur paralel-paralel dikarenakan pada pengujian sebelumnya ditemukan bahwa rangkaian murni paralel-paralel adalah yang terbaik dalam menghasilkan arus guna melakukan pengecasan pada sebuah baterai. Namun, agar hasil penggabungan dari elemen-elemen piezoelektrik tersebut dapat digunakan untuk pengecasan, penulis menggunakan rangkaian penyearah tipe jembatan dioda sebagai jalur integrasi sebelum penyatuan output ke rangkaian pengecasan. Untuk mendukung fungsi pemantauan dan pengumpulan data, pengembangan juga mencakup integrasi mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan platform Blynk IoT. Hal ini menjadikan sistem piezoelektrik lebih adaptif pada skenario Internet of Things. Pada tahap ini juga penulis melakukan validasi

untuk setiap blok yang telah penulis kembangkan untuk dikonfigurasi pada prototipe yang lebih besar, berikut merupakan hasil pengukuran blok 1.

Tabel 4. 13 Pengujian Blok 1 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 1 (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	19,8	9
2	30,1	14,2
3	45,7	24,9
4	37,2	2,6
5	19,5	21,7
6	25,1	12,4
7	28,3	26,1
8	31,6	25,8
9	21,6	25
10	27,7	23,8
Rata-Rata	28,66	18,55



Gambar 4. 34 Pengujian Blok 1 Dengan Massa 69kg Pengukuran Tegangan



Gambar 4. 35 Pengujian Blok 1 Dengan Massa 69kg Pengukuran Arus

Pengujian pada blok 1 dengan konfigurasi paralel-paralel menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan tegangan dan arus yang cukup tinggi, dengan rata-rata tegangan sebesar 28,66 V dan rata-rata arus 18,55 mA pada massa injakan

69 kg. Nilai arus tertinggi mencapai 26,1 mA, mengonfirmasi efektivitas konfigurasi ini dalam menghasilkan arus besar yang dibutuhkan untuk pengisian baterai. Fluktuasi arus dan tegangan antartekanan menunjukkan adanya pengaruh distribusi gaya dan respons elemen yang belum sepenuhnya seragam.

Tabel 4. 14 Pengujian Blok 1 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 1 (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	5,4	12,3
2	11,6	16,2
3	10,9	15,5
4	14,9	20,2
5	15,5	19
6	18,5	14,4
7	14,2	13
8	16,2	14,6
9	9,7	16,4
10	16,6	20,4
Rata-Rata	13,35	16,63

Pengujian Blok 1 dengan massa 98 kg menunjukkan performa yang cukup stabil dan kuat dalam menghasilkan arus dan tegangan. Rata-rata tegangan yang dihasilkan adalah 13,35 V, sedangkan rata-rata arus mencapai 16,63 mA. Nilai arus tertinggi mencapai 20,4 mA, sementara tegangan maksimum tercatat sebesar 18,5 V. Meskipun tegangan rata-rata lebih rendah dibandingkan saat massa 69 kg, arus yang dihasilkan justru lebih stabil dan mendekati kebutuhan untuk pengisian energi. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan massa berkontribusi terhadap peningkatan tekanan efektif pada elemen piezoelektrik, yang berdampak positif terhadap output arus, meskipun tidak selalu linier terhadap tegangan. Secara umum, hasil ini memperkuat bahwa konfigurasi paralel-paralel tetap konsisten dalam menghasilkan arus besar, dan performa blok ini layak digunakan dalam penyusunan sistem utama, terutama bila digabungkan dengan blok-blok lain untuk meningkatkan total daya yang dapat dimanfaatkan.

Tabel 4. 15 Pengujian Blok 2 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 2 (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	9,4	1,8
2	18,7	4,8
3	14,6	4,8
4	14,8	5,1
5	16,5	3,8
6	14,7	6,2
7	13,1	8,2
8	16,5	3,3
9	14,9	7,5
10	11,4	7,3
Rata-Rata	14,46	5,28



Gambar 4. 36 Pengujian Blok 2 Dengan Massa 69kg Pengukuran Tegangan



Gambar 4. 37 Pengujian Blok 2 Dengan Massa 69kg Pengukuran Arus

Pengujian Blok 2 menggunakan massa 69 kg menunjukkan performa yang cukup baik dengan rata-rata tegangan sebesar 14,46 V dan rata-rata arus sebesar 5,28 mA. Tegangan tertinggi tercatat sebesar 18,7 V, sementara arus maksimum

mencapai 8,2 mA. Hasil ini memperlihatkan bahwa output arus dari Blok 2 cenderung lebih rendah dibandingkan Blok 1, meskipun dengan tegangan yang relatif sebanding. Fluktuasi arus antar tekanan cukup signifikan, mengindikasikan bahwa distribusi gaya atau respons antar elemen belum sepenuhnya seragam. Meski demikian, performa Blok 2 tetap menunjukkan bahwa konfigurasi paralel-paralel mampu menghasilkan arus yang mencukupi untuk pengujian dasar sistem pemanen energi.

Tabel 4. 16 Pengujian Blok 2 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 2 (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	12,8	9
2	13,6	11,5
3	13	11,2
4	8,4	15,4
5	8,1	16
6	23,2	16,9
7	13,3	13
8	13,6	11,7
9	21,9	15
10	17,9	13,3
Rata-Rata	14,58	13,3

Pengujian Blok 2 dengan massa 98 kg menunjukkan peningkatan signifikan pada performa output dibandingkan saat massa 69 kg. Rata-rata tegangan tercatat sebesar 14,58 V, dengan rata-rata arus mencapai 13,3 mA. Tegangan tertinggi mencapai 23,2 V, sedangkan arus maksimum berada di angka 16,9 mA. Kenaikan beban memberikan pengaruh positif terhadap arus yang dihasilkan, menandakan bahwa elemen piezoelektrik dalam konfigurasi paralel-paralel merespons tekanan yang lebih besar dengan output arus yang lebih stabil dan tinggi. Variasi nilai masih terjadi, tetapi fluktuasinya lebih kecil dibanding pengujian dengan massa lebih ringan, menunjukkan kinerja yang lebih konsisten. Secara keseluruhan, hasil ini memperkuat efektivitas Blok 2 dalam konfigurasi ini dan menunjukkan bahwa peningkatan massa injakan dapat meningkatkan efisiensi konversi energi, terutama dalam aspek arus yang krusial untuk aplikasi pengisian daya. Dengan hasil ini, Blok

2 tetap layak digunakan sebagai bagian dari sistem prototipe utama, terutama jika dikombinasikan dengan blok-blok lain untuk mencapai target daya yang lebih tinggi secara keseluruhan.

Tabel 4. 17 Pengujian Blok 3 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 3 (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	15,1	1,2
2	14,2	2,6
3	11	2,7
4	20,4	5,5
5	18,7	5,1
6	12,5	2,7
7	10,3	5,5
8	14,9	4,9
9	17,3	1,6
10	3	2,4
Rata-Rata	13,74	3,67

Pengujian Blok 3 dengan massa 69 kg menghasilkan rata-rata tegangan sebesar 13,74 V dan rata-rata arus 3,67 mA. Tegangan maksimum tercatat sebesar 20,4 V, sementara arus tertinggi mencapai 5,5 mA. Meskipun beberapa tekanan menghasilkan output yang cukup tinggi, seperti pada tekanan ke-4 dan ke-5, terdapat juga nilai rendah yang signifikan, khususnya pada tekanan ke-10, yang hanya menghasilkan 3 V dan 2,4 mA, menurunkan rata-rata keseluruhan. Hasil ini menunjukkan bahwa performa Blok 3 kurang stabil, dengan fluktuasi yang cukup besar antar tekanan. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh distribusi tekanan yang tidak merata atau respons elemen piezoelektrik yang tidak konsisten di dalam blok. Secara umum, meskipun Blok 3 masih menunjukkan karakteristik dasar dari konfigurasi paralel-paralel dalam menghasilkan arus yang dapat dimanfaatkan, kinerjanya tergolong lebih rendah dibandingkan Blok 1 dan Blok 2, dan perlu dievaluasi lebih lanjut jika akan digunakan dalam sistem akhir.

Tabel 4. 18 Pengujian Blok 3 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 3 (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)

1	11,9	3
2	9,7	4,1
3	15,7	4,7
4	15,2	3,8
5	13,2	4,6
6	11,9	6,3
7	7,9	7,8
8	13	6,7
9	8,3	6,3
10	12,6	5,6
Rata-Rata	11,94	5,29

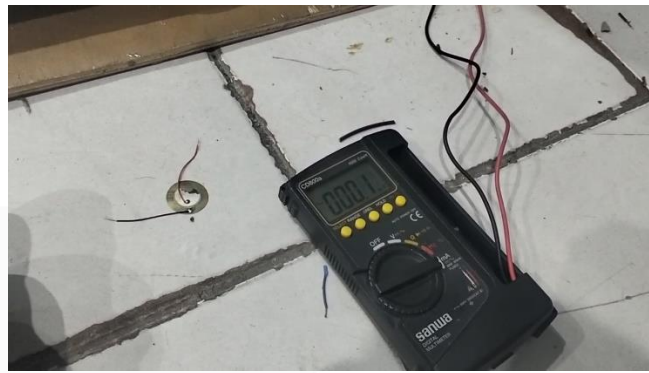
Pengujian Blok 3 dengan massa 98 kg menunjukkan perbaikan performa dibandingkan uji sebelumnya (massa 69 kg). Rata-rata tegangan tercatat sebesar 11,94 V, dan rata-rata arus meningkat menjadi 5,29 mA. Arus tertinggi tercapai pada tekanan ke-7 sebesar 7,8 mA, sedangkan tegangan maksimum berada di angka 15,7 V. Peningkatan massa memberikan dampak positif terhadap output arus, seperti yang terlihat pada sebagian besar titik tekanan. Namun, tegangan yang dihasilkan masih tergolong sedang dan cenderung lebih rendah dibandingkan blok-blok lain. Variasi nilai antar tekanan tidak terlalu ekstrem, menandakan respon yang mulai stabil, meskipun masih belum optimal. Blok ini tetap layak untuk digabungkan dalam sistem utama, khususnya untuk mendukung peningkatan total arus output saat digunakan secara kolektif.

Tabel 4. 19 Pengujian Blok 4 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 4 (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	0,3	3
2	0,6	0,3
3	0,4	0,1
4	0,6	0,1
5	1,3	0,2
6	3,1	0,1
7	1,4	0,1
8	5,4	0,2
9	3,9	0,1
10	3,9	0,1
Rata-Rata	2,09	0,43



Gambar 4. 38 Pengujian Blok 4 Dengan Massa 69kg Pengukuran Tegangan



Gambar 4. 39 Pengujian Blok 4 Dengan Massa 69kg Pengukuran Arus

Pengujian Blok 4 dengan massa 69 kg menunjukkan performa yang sangat buruk dan jauh di bawah standar minimal yang dibutuhkan untuk sistem pemanen energi. Tegangan rata-rata hanya sebesar 2,09 V, dan arus rata-rata sangat rendah, yaitu 0,43 mA. Mayoritas tekanan menghasilkan arus mendekati 0,1 mA, dan tidak ada nilai arus yang konsisten meningkat meskipun terjadi variasi tekanan. Dengan performa yang sangat rendah ini, dalam evaluasi sementara blok 4 dinyatakan tidak layak untuk digunakan dalam penggabungan sistem utama. Perlu dilakukan evaluasi fisik dan teknis lebih lanjut untuk mengetahui penyebab utama kegagalan blok, namun dalam konteks efisiensi dan kelayakan desain akhir, blok ini dikeluarkan dari konfigurasi akhir sistem.

Tabel 4. 20 Pengujian Blok 4 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 4 (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	8,4	0,2
2	6,7	0,3
3	3	0,1
4	5,4	0,2
5	3,7	0,4
6	3,9	0,6
7	2,4	0,8
8	2,5	0,3
9	6	0,3
10	2,2	4,2
Rata-Rata	4,42	0,74

Pengujian Blok 4 dengan massa 98 kg menunjukkan sedikit peningkatan dibandingkan pengujian sebelumnya (69 kg), namun performanya masih sangat rendah dan tidak memadai. Tegangan rata-rata tercatat sebesar 4,42 V, dan arus rata-rata hanya 0,74 mA. Meskipun terdapat satu nilai berbeda pada tekanan ke-10 dengan arus 4,2 mA, nilai-nilai lainnya tetap rendah dan tidak stabil, sebagian besar berada di bawah 0,5 mA. Rendahnya output meskipun massa telah ditingkatkan mengindikasikan bahwa masalah mendasar dari blok ini belum teratasi. Ini dapat disebabkan oleh kerusakan elemen piezoelektrik, sambungan yang tidak sempurna, atau penurunan sensitivitas bahan akibat cacat fisik. Dengan kinerja yang masih jauh di bawah rata-rata blok lainnya, dalam evaluasi sementara blok 4 tetap dinyatakan tidak layak untuk digunakan dalam sistem utama. Demi efisiensi dan kestabilan sistem secara keseluruhan, blok ini sebaiknya dikeluarkan dari konfigurasi final.

Tabel 4. 21 Pengujian Blok 5 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 5 (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	22,3	3,3
2	33,4	7,3
3	39	6,5

4	16,8	9,6
5	38,3	9,5
6	28,4	7
7	51	8,2
8	42,3	10,5
9	24,4	6,7
10	29,7	8,8
Rata-Rata	32,56	7,74

Pengujian Blok 5 dengan massa 69 kg menunjukkan performa yang sangat baik dan stabil, baik dari sisi tegangan maupun arus keluaran. Rata-rata tegangan tercatat sebesar 32,56 V, sementara rata-rata arus mencapai 7,74 mA. Tegangan maksimum mencapai 51 V, dan arus tertinggi sebesar 10,5 mA, menandakan bahwa blok ini mampu merespons tekanan secara efisien dan konsisten. Output yang dihasilkan tergolong tinggi dibandingkan sebagian besar blok lain pada massa yang sama. Nilai arus berada dalam kisaran yang ideal untuk aplikasi pengisian daya, dan variasi antar tekanan tetap dalam batas wajar tanpa menunjukkan gejala ketidakterhubungan atau respons lemah dari elemen piezoelektrik. Dengan performa yang sangat baik, Blok 5 dinyatakan sangat layak untuk digunakan dalam sistem utama.

Tabel 4. 22 Pengujian Blok 5 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 5 (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	11,1	8,1
2	8,5	7,6
3	13,2	2,7
4	16	5,7
5	26	5,8
6	30,2	3,4
7	30,7	6,4
8	35,2	5,5
9	26	5,9
10	15	5,6
Rata-Rata	21,19	5,67

Pengujian Blok 5 dengan massa 98 kg menunjukkan performa yang masih sangat baik dan stabil, meskipun terjadi sedikit penurunan arus rata-rata

dibandingkan saat diuji dengan massa 69 kg. Rata-rata tegangan tercatat sebesar 21,19 V, dan rata-rata arus sebesar 5,67 mA. Tegangan maksimum mencapai 35,2 V, sedangkan arus tertinggi adalah 8,1 mA. Meskipun nilai tegangan dan arus sedikit menurun, performa blok ini tetap berada dalam kisaran yang cukup tinggi dan konsisten, menunjukkan bahwa elemen piezoelektrik merespons tekanan dengan baik. Variasi antarnilai tidak ekstrem, yang menandakan bahwa distribusi tekanan pada permukaan blok cukup merata dan elemen-elemen bekerja secara efektif. Secara keseluruhan, Blok 5 tetap sangat layak digunakan dalam sistem utama. Kinerjanya yang stabil, baik pada massa rendah maupun tinggi, menjadikannya salah satu blok dengan performa paling solid untuk mendukung efisiensi total output energi dalam sistem.

Tabel 4. 23 Pengujian Blok 6 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 6 (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	5,9	6,4
2	5	2,9
3	5,7	4,3
4	2	2,5
5	6,8	3,1
6	1,3	4
7	4,4	5,9
8	3,7	3,2
9	3,8	2,9
10	1,7	5,8
Rata-Rata	4,03	4,1

Pengujian Blok 6 dengan massa 69 kg menghasilkan rata-rata tegangan sebesar 4,03 V dan rata-rata arus 4,1 mA. Meskipun nilai tegangannya berada pada tingkat yang relatif rendah, arus yang dihasilkan cukup stabil, dengan beberapa titik menunjukkan performa yang baik, seperti arus 6,4 mA pada tegangan 5,9 V dan 5,9 mA pada tegangan 4,4 V. Nilai arus yang cukup merata di berbagai titik tekanan menunjukkan bahwa elemen piezoelektrik dalam blok ini masih responsif dan aktif, meskipun tidak dalam level maksimal seperti beberapa blok lainnya. Dengan

demikian, Blok 6 masih layak digunakan sebagai bagian dari konfigurasi sistem utama, terutama jika ditujukan untuk menambah kontribusi arus dalam kombinasi beberapa blok.

Tabel 4. 24 Pengujian Blok 6 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 6 (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	1,1	4,4
2	3,6	9,1
3	1,5	4,2
4	4,8	4,8
5	4,1	1
6	3,8	4,7
7	4,8	1,4
8	4,4	4,3
9	1,8	4,1
10	4,8	1,5
Rata-Rata	3,47	3,95

Pengujian Blok 6 dengan massa 98 kg menunjukkan bahwa meskipun nilai tegangannya tergolong rendah, blok ini tetap menunjukkan performa arus yang cukup stabil. Rata-rata tegangan tercatat sebesar 3,47 V, sedangkan rata-rata arus mencapai 3,95 mA. Beberapa titik tekanan menunjukkan arus yang cukup baik, seperti 9,1 mA pada tegangan 3,6 V dan 4,8 mA pada 4,8 V, menandakan bahwa elemen piezoelektrik dalam blok ini tetap merespons tekanan secara fungsional. Fluktuasi memang terjadi, namun tidak ekstrem, dan sebagian besar nilai arus berada dalam rentang 4–5 mA. Hal ini menunjukkan bahwa arus yang dihasilkan cukup konsisten, dan meskipun tegangan rendah.

Tabel 4. 25 Pengujian Blok 7 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 7 (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	2,4	2,8
2	4,7	3,5
3	11	4,3
4	7,9	4,7
5	13,9	6,9
6	13,2	4,3

7	10,5	6,4
8	11	1,7
9	12,3	4,6
10	16,1	3,8
Rata-Rata	10,3	4,3

Pengujian Blok 7 dengan massa 69 kg menunjukkan performa yang cukup baik dan seimbang antara tegangan dan arus. Rata-rata tegangan tercatat sebesar 10,3 V, sementara rata-rata arus mencapai 4,3 mA. Tegangan tertinggi diperoleh pada tekanan ke-10 sebesar 16,1 V, dan arus maksimum 6,9 mA pada tekanan ke-5. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa elemen piezoelektrik dalam blok memberikan respon yang konsisten dan fungsional terhadap tekanan.

Tabel 4. 26 Pengujian Blok 7 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 7 (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	3,2	4,2
2	11,3	3,6
3	9,7	5,1
4	4,4	9,2
5	11,3	4,5
6	10	3
7	9,2	6,9
8	3,3	3,1
9	6,5	6,6
10	7,1	3,6
Rata-Rata	7,6	4,98

Pengujian Blok 7 dengan massa 98 kg menunjukkan performa yang stabil dan layak, dengan rata-rata tegangan sebesar 7,6 V dan rata-rata arus sebesar 4,98 mA. Tegangan tertinggi tercatat sebesar 11,3 V pada beberapa titik, sedangkan arus maksimum mencapai 9,2 mA pada tekanan ke-4. Kinerja blok ini menunjukkan respons yang baik terhadap tekanan dengan variasi tegangan dan arus yang tidak ekstrem. Meskipun terdapat fluktuasi pada beberapa titik tekanan, sebagian besar nilai arus berada di atas 4 mA, menunjukkan bahwa elemen piezoelektrik bekerja secara efektif. Dengan hasil ini, Blok 7 tetap dinyatakan layak digunakan dalam sistem utama.

Tabel 4. 27 Pengujian Blok 8 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 8 (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	28,2	15,2
2	25,9	11,7
3	45,6	25,5
4	27,4	14,2
5	48,2	10,6
6	20,5	27,4
7	45,3	14
8	31,4	25,2
9	21,4	21,9
10	11,4	22,6
Rata-Rata	30,53	18,83

Pengujian Blok 8 dengan massa 69 kg menunjukkan performa yang sangat baik, dengan rata-rata tegangan sebesar 30,53 V dan rata-rata arus sebesar 18,83 mA. Tegangan maksimum mencapai 48,2 V, sementara arus tertinggi tercatat 27,4 mA, menunjukkan bahwa blok ini mampu menghasilkan daya yang tinggi secara konsisten. Nilai-nilai tegangan dan arus yang dihasilkan relatif tinggi dan stabil di hampir semua titik tekanan. Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi tekanan merata, dan elemen piezoelektrik dalam konfigurasi paralel-paralel bekerja dengan efisien dan seragam.

Tabel 4. 28 Pengujian Blok 8 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 8 (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	21,4	13
2	25,6	19,6
3	24,7	10,8
4	26,3	10,9
5	34,1	17
6	26,9	11,6
7	26,1	11,5
8	43	14,6
9	35,5	14,3
10	35,9	13,5
Rata-Rata	29,29	13,68



Gambar 4. 40 Pengujian Blok 8 Dengan Massa 98kg Pengukuran Arus



Gambar 4. 41 Pengujian Blok 8 Dengan Massa 98kg Pengukuran Tegangan

Pengujian Blok 8 dengan massa 98 kg menunjukkan performa yang sangat solid dan konsisten, dengan rata-rata tegangan sebesar 29,29 V dan rata-rata arus sebesar 13,68 mA. Tegangan tertinggi tercatat sebesar 43 V, sementara arus maksimum mencapai 19,6 mA. Hampir semua titik menunjukkan output yang stabil dan berada dalam kisaran tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa elemen piezoelektrik dalam blok merespons tekanan berat dengan efisiensi yang baik dan menghasilkan daya keluaran yang kuat secara konsisten. Dengan performa unggul pada kedua beban, Blok 8 sangat layak digunakan dalam sistem utama dan merupakan salah satu kandidat terkuat untuk mendukung aplikasi sistem konversi energi berbasis piezoelektrik.

Tabel 4. 29 Pengujian Blok 9 menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 9 (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	10,1	2,6
2	10,8	1,8

3	9,8	3,3
4	6,6	3,6
5	7,6	3,6
6	6,3	2,1
7	4,8	2,4
8	10,3	3,2
9	7,8	3
10	10,1	3
Rata-Rata	8,42	2,86

Pengujian Blok 9 dengan massa 69 kg menunjukkan performa yang cukup rendah, baik dari sisi tegangan maupun arus. Rata-rata tegangan tercatat sebesar 8,42 V, sedangkan rata-rata arus sebesar 2,86 mA. Tegangan maksimum berada di angka 10,8 V, dan arus tertinggi hanya 3,6 mA, yang relatif kecil dibandingkan dengan blok-blok berperforma tinggi lainnya. Output arus dan tegangan dari tekanan ke tekanan tampak cukup seragam, namun dalam kisaran yang rendah, mengindikasikan bahwa elemen piezoelektrik aktif namun tidak bekerja dalam kapasitas optimal. Hal ini dapat disebabkan oleh penurunan efisiensi konversi energi atau distribusi tekanan yang kurang maksimal pada permukaan blok.

Tabel 4. 30 Pengujian Blok 9 menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Blok 9 (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	5,7	7,7
2	7,5	8,2
3	8	8,7
4	8,5	10
5	9,8	10,1
6	9,6	10,5
7	10,1	11
8	9,3	9,9
9	7,1	9,6
10	9,7	9,2
Rata-Rata	8,53	9,49

Pengujian Blok 9 dengan massa 98 kg menunjukkan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan saat menggunakan massa 69 kg. Rata-rata tegangan tercatat sebesar 8,53 V, dan rata-rata arus mencapai 9,49 mA, dengan arus tertinggi sebesar 11 mA dan tegangan maksimum 10,1 V. Meskipun nilai tegangannya tetap dalam kisaran menengah, performa arus meningkat drastis dan relatif stabil di

semua titik tekanan, menunjukkan bahwa konfigurasi elemen piezoelektrik dalam blok ini merespons beban berat dengan sangat baik. Ini menjadikan Blok 9 efektif sebagai sumber arus, meski tegangan tidak sekuat blok-blok lainnya. Dengan hasil ini, Blok 9 layak dimasukkan dalam sistem utama, khususnya untuk menambah pasokan arus secara konsisten.

Berdasarkan serangkaian pengujian terhadap sembilan blok piezoelektrik dengan dua variasi massa (69 kg dan 98 kg), dapat disimpulkan bahwa mayoritas blok menunjukkan performa yang layak dan stabil, baik dari segi tegangan maupun arus keluaran. Beberapa blok seperti Blok 5 dan Blok 8 mencatatkan performa unggul dengan output tegangan dan arus yang tinggi dan konsisten. Sementara itu, blok-blok lain seperti Blok 1, 2, 3, 6, 7, dan 9 menunjukkan performa cukup baik, khususnya dalam hal kontribusi arus, sehingga masih sangat layak untuk digunakan sebagai bagian dari sistem utama.

Namun demikian, Blok 4 menunjukkan performa yang sangat rendah dan tidak konsisten pada kedua variasi massa, dengan nilai tegangan dan arus jauh di bawah rata-rata blok lainnya. Hasil ini mengindikasikan adanya kemungkinan gangguan struktural, kerusakan elemen, atau sambungan yang tidak optimal, sehingga Blok 4 dinyatakan tidak layak untuk digunakan dalam sistem utama.

Dengan demikian, dari keseluruhan sembilan blok yang diuji, delapan blok dinyatakan layak untuk dirakit dalam sistem utama prototipe konversi energi piezoelektrik, sedangkan Blok 4 dikeluarkan dari konfigurasi akhir untuk menjaga efisiensi dan performa sistem secara keseluruhan.

4.6 Main Field Testing

4.6.1 Uji Konfigurasi Pada Rangkaian Terbuka dan Berbeban 1 ohm

Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi kinerja sistem piezoelektrik pada konfigurasi parallel-parallel (128 elemen), dengan fokus pada output tegangan dan arus AC. Data diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan multimeter pada kondisi rangkaian terbuka dan berbeban 1 ohm, guna mengevaluasi respons sistem terhadap variasi tekanan akibat perbedaan massa tubuh

menggunakan 2 metode pengambilan sampel yaitu melakukan pijakan seperti orang berjalan dan melompat di tempat pada prototipe. Berikut merupakan pengujian dari performa output piezoelektrik pada rangkaian terbuka dengan massa 69kg.

Tabel 4. 31 Pengujian dengan metode berjalan melintas menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Berjalan Melintas Prototipe (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	1,1	0,5
2	1,1	0,7
3	0,9	0,8
4	0,7	0,9
5	3,3	0,9
6	3,8	1,1
7	1,4	1,1
8	1	0,7
9	1,1	0,9
10	0,7	0,9
Rata-Rata	1,51	0,85

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem menghasilkan rata-rata tegangan sebesar 1,51 V dan rata-rata arus sebesar 0,85 mA. Meskipun tergolong rendah, nilai ini wajar mengingat bentuk tekanan yang diberikan bersifat ringan dan berulang, menyerupai langkah normal berjalan. Tegangan maksimum tercatat sebesar 3,8 V, dan arus tertinggi sebesar 1,1 mA, menandakan bahwa sistem tetap memberikan respon aktif, meskipun intensitas tekanannya terbatas.

Tabel 4. 32 Pengujian dengan metode berjalan melintas menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Berjalan Melintas Prototipe (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	5,2	0,8
2	1,8	1
3	8,7	1,3
4	5,7	1,3
5	6,7	1,5
6	4,8	1,5
7	5,8	1,2

8	5,9	1,3
9	5,9	1,3
10	3,9	1,4
Rata-Rata	5,44	1,26



Gambar 4. 42 Pengujian menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus dengan metode melintas



Gambar 4. 43 Pengujian menggunakan massa 98kg pada rangkaian terbuka pengukuran tegangan dengan metode melintas

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata tegangan yang dihasilkan sebesar 5,44 V dan rata-rata arus sebesar 1,26 mA. Nilai ini mengalami peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan saat menggunakan massa 69 kg, baik dari sisi tegangan maupun arus. Tegangan tertinggi mencapai 8,7 V, sedangkan arus maksimum tercatat 1,5 mA, yang menunjukkan bahwa massa tubuh lebih besar menghasilkan tekanan yang lebih efektif dalam mengaktifkan elemen piezoelektrik. Secara keseluruhan, hasil ini memperlihatkan bahwa sistem mampu menyerap dan mengonversi energi mekanik ringan menjadi energi listrik, meskipun dalam level rendah. Data ini penting sebagai baseline awal untuk membandingkan performa sistem ketika diberi tekanan yang lebih kuat, seperti pada metode melompat di tempat.

Tabel 4. 33 Pengujian dengan metode melompat menggunakan massa 69kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Melompat Pada Prototipe (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	7	4
2	7,1	4,3
3	6,2	4,3
4	8,2	4,5
5	8,3	4,1
6	6,7	2,4
7	9,5	4,,5
8	4,4	4,4
9	4,9	2,5
10	4,5	2,5
Rata-Rata	6,68	3,67

Pengujian ini dilakukan untuk mensimulasikan skenario tekanan dinamis yang lebih kuat dibandingkan aktivitas berjalan, yakni melalui melompat di tempat. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menilai sejauh mana sistem piezoelektrik dapat menghasilkan tegangan dan arus lebih besar saat diberikan impuls tekanan yang lebih tinggi, namun tetap dalam pola ritmis dan berulang. Pengujian dilakukan menggunakan massa 69 kg, dan output sistem diukur dengan multimeter pada beban 1 ohm dan kondisi rangkaian terbuka.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata tegangan yang dihasilkan adalah 6,68 V, sedangkan rata-rata arus sebesar 3,67 mA. Nilai maksimum tegangan tercatat 9,5 V, dan arus tertinggi sebesar 4,5 mA. Jika dibandingkan dengan pengujian berjalan menggunakan massa yang sama, terdapat peningkatan signifikan pada kedua parameter ini, yang menandakan bahwa aktivitas melompat menghasilkan tekanan vertikal yang jauh lebih kuat dan efektif dalam menstimulasi elemen piezoelektrik.

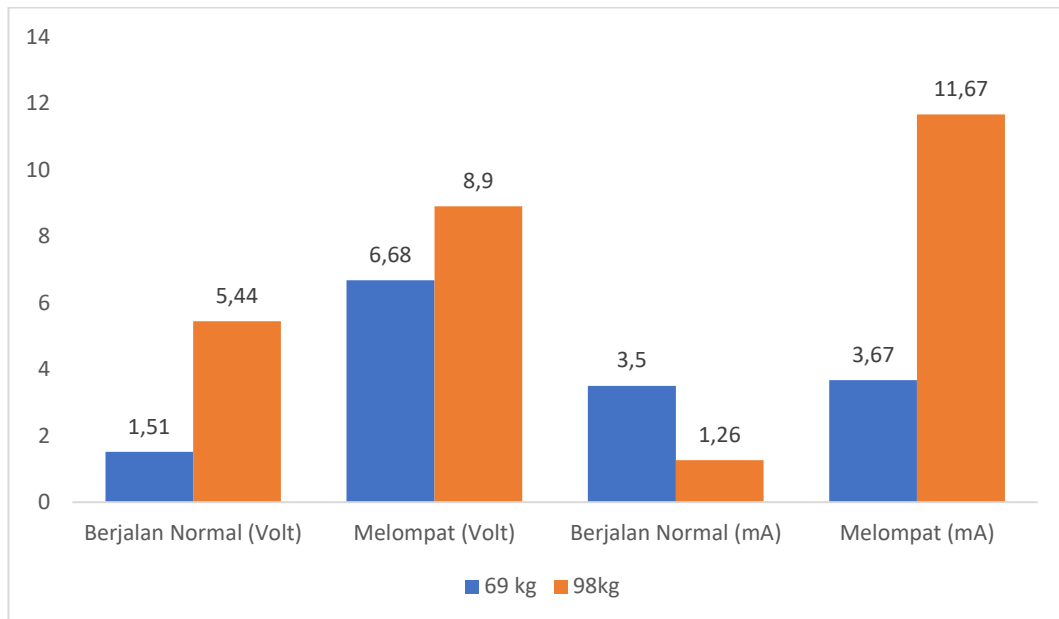
Tabel 4. 34 Pengujian dengan metode melompat menggunakan massa 98kg dan beban 1 ohm pada pengukuran arus

Melompat Pada Prototipe (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	9,1	7,5

2	8,5	7
3	10,6	11,8
4	7,2	16,1
5	10,8	14,9
6	9,6	10,3
7	7,2	13,4
8	10,4	12,3
9	9,5	11,5
10	6,1	11,9
Rata-Rata	8,9	11,67

Pengujian ini merupakan bagian dari validasi akhir terhadap performa sistem piezoelektrik ketika menerima tekanan dinamis dengan intensitas tinggi, melalui metode melompat di tempat menggunakan massa tubuh 98 kg. Tujuannya adalah untuk mengetahui respons maksimum sistem dalam menghasilkan tegangan dan arus AC dari tekanan impulsif yang besar. Seperti sebelumnya, data diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan multimeter, dengan beban 1 ohm dan kondisi rangkaian terbuka.

Hasilnya menunjukkan rata-rata tegangan sebesar 8,9 V dan rata-rata arus mencapai 11,67 mA, yang merupakan nilai tertinggi dibanding seluruh skenario pengujian sebelumnya. Tegangan maksimum tercatat 10,8 V, dan arus puncak mencapai 16,1 mA. Ini menunjukkan bahwa konfigurasi paralel-paralel pada 128 elemen sangat efektif dalam merespons tekanan tinggi, menghasilkan output daya yang besar dan stabil. Peningkatan signifikan ini juga membuktikan bahwa sistem piezoelektrik sangat sensitif terhadap peningkatan beban dan gaya tekanan vertikal. Performa sistem dalam skenario ini mengonfirmasi bahwa penggunaan massa tubuh yang lebih besar dan aktivitas impulsif seperti melompat mampu mengoptimalkan keluaran energi. Berikut perbandingan keluaran sistem dengan stimulasi lompatan dan pijakan normal pada kondisi rangkaian terbuka serta beban 1 ohm.



Gambar 4. 44 Grafik perbandingan output dengan metode melompat dan melintas

Berdasarkan grafik perbandingan performa sistem piezoelektrik pada konfigurasi paralel-paralel (128 elemen), terlihat bahwa aktivitas melompat memberikan output tegangan dan arus yang jauh lebih tinggi dibandingkan berjalan normal, baik pada massa 69 kg maupun 98 kg. Pada massa 69 kg, tegangan saat melompat tercatat 6,68 V dengan arus 3,67 mA, jauh di atas saat berjalan normal yang hanya menghasilkan 1,51 V dan 0,85 mA. Perbedaan ini semakin signifikan pada massa 98 kg, di mana melompat menghasilkan 8,9 V dan 11,67 mA, sementara berjalan hanya mencapai 5,44 V dan 1,26 mA. Hal ini membuktikan bahwa tekanan impulsif dari aktivitas melompat lebih efektif dalam memicu respons piezoelektrik secara maksimal, sehingga aktivitas melompat merupakan metode paling optimal untuk menghasilkan output energi tertinggi pada sistem piezoelektrik ini.

4.6.2 Uji Konfigurasi Pada Rangkaian Pengecasan

Setelah tahap pengujian performa output piezoelektrik secara langsung terhadap variasi tekanan berhasil dilakukan, pengujian dilanjutkan dengan skenario serupa, namun kali ini fokus diarahkan pada pengukuran tegangan dan arus AC yang masuk ke rangkaian pengecasan. Meskipun sistem belum melalui proses penyearahan, pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi besarnya daya listrik dalam bentuk AC yang berhasil dihantarkan menuju rangkaian pengecasan, sebagai

bentuk validasi aliran energi dari sistem piezoelektrik menuju tahap selanjutnya. Pengukuran ini penting untuk mengetahui potensi aktual energi yang tersedia sebelum proses konversi ke DC. Berikut merupakan hasil pengukuran arus dan tegangan AC yang diantarkan ke rangkaian pengecasan.

Tabel 4. 35 Pengujian dengan metode berjalan melintas menggunakan massa 69kg dan beban rangkaian pengecasan

Berjalan Melintas Prototipe (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	5,9	0,3
2	3,9	0,3
3	3,4	0,4
4	1,8	0,7
5	6	0,,3
6	6,9	0,3
7	3,4	0,4
8	6,4	0,5
9	3,1	0,5
10	5,3	0,4
Rata-Rata	4,61	0,42

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata tegangan AC yang masuk ke rangkaian pengecasan adalah 4,61 V, dengan rata-rata arus sebesar 0,42 mA. Nilai tegangan tertinggi mencapai 6,9 V, sementara arus maksimum tercatat 0,7 mA. Meskipun tidak sebesar nilai output langsung dari piezoelektrik, hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu menyalurkan energi secara stabil ke jalur pengecasan, meskipun masih dalam kondisi sinyal bolak-balik (AC). Data ini penting sebagai indikator awal efisiensi aliran daya menuju komponen konversi, dan menjadi dasar untuk mengamati perubahan performa pada skenario tekanan yang lebih besar.

Tabel 4. 36 Pengujian dengan metode berjalan melintas menggunakan massa 98kg dan beban rangkaian pengecasan

Berjalan Melintas Prototipe (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	1,1	0,4

2	0,9	0,6
3	0,9	0,9
4	1,6	0,9
5	3,7	0,8
6	4,5	0,7
7	4,3	0,9
8	4,2	1
9	1,2	0,7
10	1,2	0,6
Rata-Rata	2,36	0,75

Pada pengujian berjalan melintasi prototipe, sistem piezoelektrik menghasilkan rata-rata tegangan sebesar 4,61 V dan arus 0,42 mA pada massa 69 kg. Sementara itu, pada massa 98 kg, terjadi penurunan tegangan menjadi 2,36 V, namun arus meningkat menjadi 0,75 mA. Hal ini menunjukkan bahwa massa yang lebih besar cenderung menghasilkan arus lebih tinggi meskipun tidak selalu sebanding dengan tegangan.

Secara umum, meskipun tekanan yang diberikan tergolong ringan dan merata, sistem tetap mampu menghantarkan energi dalam bentuk AC menuju rangkaian pengecasan secara konsisten. Hasil ini memperlihatkan bahwa konfigurasi paralel-paralel tetap efektif dalam merespons tekanan rendah, khususnya untuk menghasilkan arus yang relatif stabil.

Tabel 4. 37 Pengujian dengan metode melompat menggunakan massa 69kg dan beban rangkaian pengecasan

Melompat Pada Prototipe (massa 69kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	7,9	0,7
2	4,6	1,1
3	10,1	1,3
4	8,6	0,6
5	5,7	0,3
6	9,5	0,7
7	3,8	1
8	7,6	1,1
9	7,9	2,8
10	8,1	1
Rata-Rata	7,38	1,06

Pada pengujian melompat di atas prototipe dengan massa 69 kg, sistem piezoelektrik menunjukkan peningkatan output dibandingkan kondisi berjalan, dengan rata-rata tegangan sebesar 7,38 V dan arus 1,06 mA. Nilai tegangan tertinggi mencapai 10,1 V, sementara arus maksimum tercatat 2,8 mA, menunjukkan bahwa tekanan impulsif dari aktivitas melompat mampu menghasilkan output energi yang lebih besar.

Tabel 4. 38 Pengujian dengan metode melompat menggunakan massa 98kg dan beban rangkaian pengecasan

Melompat Pada Prototipe (massa 98kg)		
Tekanan ke	Tegangan (V)	Arus (mA)
1	5,5	2,2
2	5,6	2,6
3	3,5	4,9
4	4,7	5,7
5	5,5	0,3
6	2,4	4,8
7	5,4	3,6
8	6,8	3,8
9	4,2	8,7
10	7	4,7
Rata-Rata	5,06	4,12

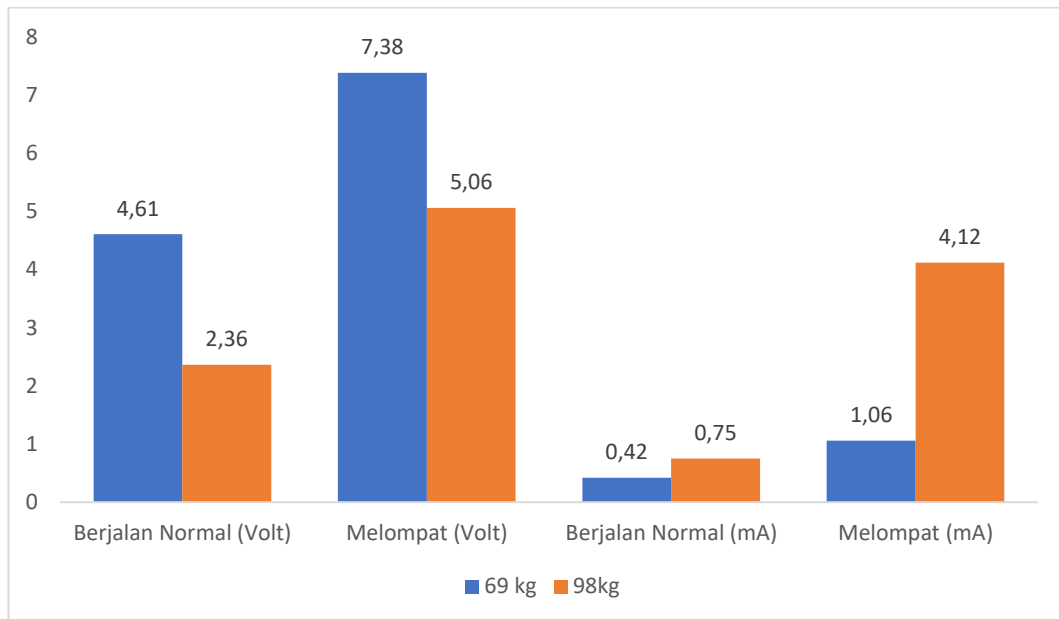


Gambar 4. 45 Pengujian menggunakan massa 98kg dan beban rangkaian pengecasan pada pengukuran arus dengan metode melompat

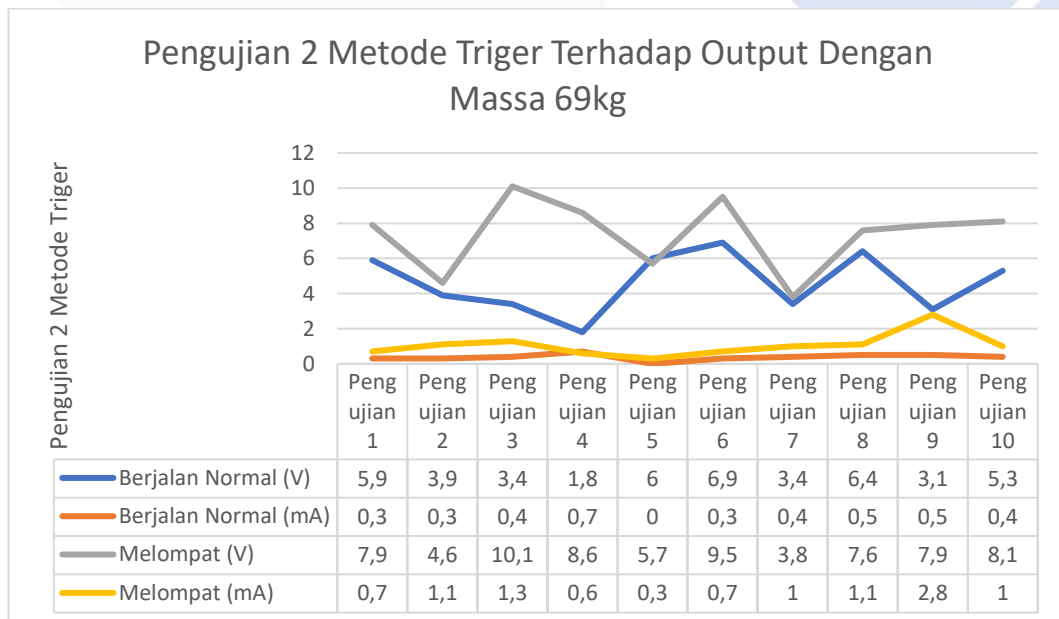


Gambar 4. 46 Pengujian menggunakan massa 98kg dan beban rangkaian pengecasan pada pengukuran tegangan dengan metode melompat

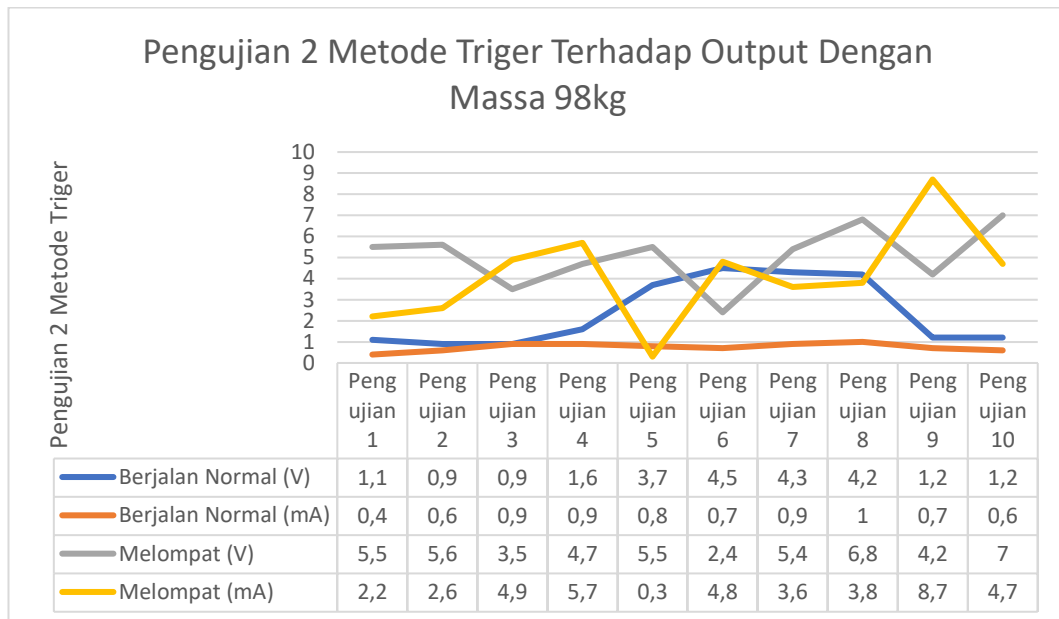
Pada pengujian melompat di atas prototipe dengan massa 98 kg, sistem piezoelektrik menunjukkan rata-rata tegangan sebesar 5,06 V dan arus yang meningkat signifikan menjadi 4,12 mA. Meskipun nilai tegangan rata-rata sedikit lebih rendah dibandingkan massa 69 kg, arus yang dihasilkan mengalami lonjakan cukup besar, dengan arus tertinggi tercatat 8,6 mA, yang mengindikasikan bahwa peningkatan massa secara langsung memperbesar respons arus sistem terhadap tekanan impulsif. Serta peningkatan ini mengonfirmasi bahwa penggunaan massa tubuh yang lebih besar dan aktivitas impulsif seperti melompat mampu mengoptimalkan keluaran energi. Berikut perbandingan keluaran sistem dengan stimulasi lompatan dan pijakan normal yang dihantarkan pada rangkaian pengecasan.



Gambar 4. 47 Grafik perbandingan output dengan metode mmpat dan melintas pada rangkaiain pengecasan



Gambar 4. 48 Grafik Pengujian 2 Metode (Melompat dan Berjalan Normal) Menggunakan Massa 69kg



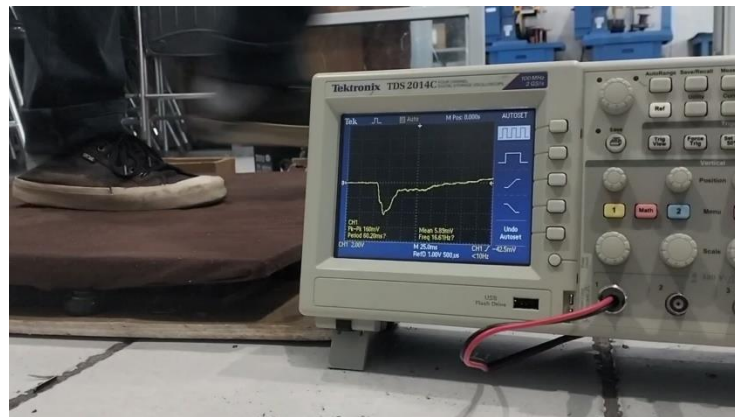
Gambar 4. 49 Grafik Pengujian 2 Metode (Melompat dan Berjalan Normal) Menggunakan Massa 98kg

Berdasarkan grafik di atas, dapat disimpulkan bahwa aktivitas melompat jauh lebih optimal dibandingkan berjalan dalam menghantarkan energi AC menuju rangkaian pengecasan. Pada massa 69 kg, melompat menghasilkan tegangan rata-rata 7,38 V dan arus 1,06 mA, jauh lebih tinggi dibandingkan berjalan yang hanya menghasilkan 4,61 V dan 0,42 mA. Demikian pula pada massa 98 kg, meskipun tegangan saat melompat sedikit lebih rendah (5,06 V) dibandingkan massa 69 kg, arus yang dihasilkan meningkat drastis menjadi 4,12 mA, jauh di atas arus saat berjalan yaitu 0,75 mA. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan impulsif akibat melompat secara konsisten menghasilkan daya yang lebih besar, menjadikannya metode paling efektif untuk memaksimalkan performa sistem piezoelektrik dalam aplikasi pengisian energi.

4.6.3 Pengujian Pada Osiloskop

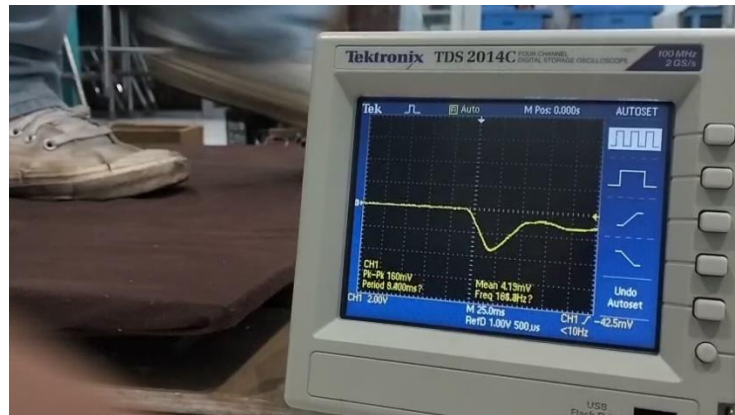
Setelah dilakukan serangkaian pengujian terhadap tegangan dan arus AC yang dihantarkan dari sistem piezoelektrik menuju rangkaian pengecasan, baik pada kondisi berjalan maupun melompat, diperlukan data pelengkap guna memperoleh gambaran yang lebih utuh terkait karakteristik sinyal listrik yang dihasilkan. Dalam hal ini, pembacaan menggunakan osiloskop digunakan untuk

mengamati bentuk gelombang, frekuensi, serta kestabilan sinyal AC sebelum proses penyearahan. Berikut merupakan beberapa bentuk sinyal yang dihasilkan konfigurasi piezoelektrik parallel-parallel sebelum dihantarkan ke rangkaian pengecasan.



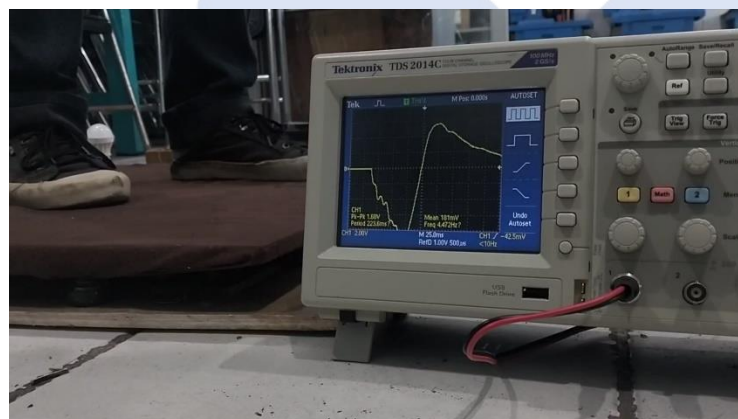
Gambar 4. 50 Pengecekan sinyal sistem menggunakan massa 69kg dengan metode melintas

Gambar di atas menunjukkan proses pengecekan bentuk sinyal keluaran dari sistem piezoelektrik menggunakan osiloskop digital Tektronix TDS 2014C, saat dilakukan penekanan pada prototipe oleh subjek dengan massa 69 kg menggunakan metode berjalan melintas. Dari tampilan layar osiloskop terlihat adanya respons tegangan AC yang dihasilkan akibat tekanan mekanik yang diterima oleh sistem piezoelektrik. Gelombang yang muncul tidak sepenuhnya sinusoidal, melainkan bersifat tidak beraturan (transien), yang merupakan karakteristik umum dari sumber piezoelektrik ketika menerima tekanan sesaat.



Gambar 4. 51 Pengecekan sinyal sistem menggunakan massa 98kg dengan metode melintas

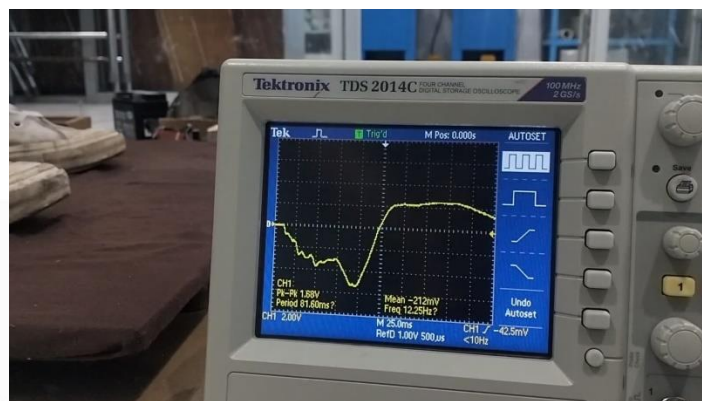
Tampilan sinyal pada layar osiloskop menunjukkan bentuk gelombang transien dengan karakteristik puncak negatif sesaat, yang merupakan respons dari elemen piezoelektrik terhadap tekanan mekanis. Dari tampilan osiloskop juga dapat diamati informasi penting seperti tegangan puncak (peak), periode gelombang, serta frekuensi yang terbaca sekitar 188,10 Hz, yang cukup tinggi mengingat pola tekanan berlangsung secara singkat dan impulsif. Bentuk sinyal ini menegaskan bahwa beban yang lebih besar mampu menghasilkan respons tegangan yang lebih cepat dan tajam.



Gambar 4. 52 Pengecekan sinyal sistem menggunakan massa 69kg dengan metode melompat pada prototipe

Berdasarkan tampilan osiloskop Tektronix TDS 2014C, gelombang yang terbentuk memiliki karakteristik transien dengan tegangan puncak yang lebih tinggi

dibandingkan pengujian metode berjalan. Hal ini menunjukkan adanya energi mekanik yang lebih besar saat lompatan terjadi, menghasilkan perubahan tekanan yang signifikan pada elemen piezoelektrik. Terlihat pula bahwa frekuensi sinyal yang terbaca adalah 186,07 Hz, yang merepresentasikan respon cepat sistem terhadap gaya impulsif. Selain itu, bentuk gelombang yang naik tajam dan menurun perlahan menunjukkan adanya pemulihan muatan yang cukup stabil setelah tekanan dilepaskan. Pola ini mendukung temuan sebelumnya bahwa metode melompat lebih efektif dalam menghasilkan output energi pada konfigurasi paralel-paralel.



Gambar 4. 53 Pengecekan sinyal sistem menggunakan massa 98kg dengan metode melompat pada prototipe

Pada layar osiloskop Tektronix TDS 2014C, terlihat bentuk gelombang transien yang cukup tajam dengan puncak negatif yang signifikan, menandakan respons cepat sistem terhadap tekanan tinggi yang ditimbulkan oleh beban besar. Frekuensi sinyal tercatat sebesar 61,08 Hz, menunjukkan adanya respons dinamis yang berbeda dibandingkan metode berjalan atau massa yang lebih kecil. Bentuk gelombang yang kompleks dengan penurunan cepat dan kenaikan gradual mencerminkan karakteristik mekanis-elektrik dari piezoelektrik yang sensitif terhadap lonjakan tekanan. Hal ini semakin menguatkan bahwa metode melompat, khususnya dengan massa yang lebih besar, mampu menghasilkan output energi yang lebih optimal dari sisi amplitudo dan kestabilan sinyal sebelum proses penyearahan.

4.6.4 Menghitung Impedansi Sistem

Berdasarkan struktur sistem yang telah dikembangkan, impedansi total dari sisi input dihitung berdasarkan tegangan dan arus AC sebelum proses penyearahan, dengan rumus $Z=V/I$. Pendekatan ini memberikan gambaran umum mengenai beban efektif yang dilihat oleh sumber piezoelektrik. Namun, setelah melalui dioda bridge dan rangkaian filter kapasitor, sinyal berubah menjadi DC, sehingga pendekatan impedansi berbasis frekuensi tidak lagi relevan.

Oleh karena itu berdasarkan rumusan tersebut dapat dihitung impedansi total sistem pada massa 69kg dengan metode melintas pada prototipe adalah sebagai berikut:

$$Z = \frac{V}{I}$$

$$Z = \frac{4,61}{0,42}$$

$$Z = 10,97 \text{ ohm}$$

Selain itu impedansi total sistem pada massa 98kg dengan metode melintas pada prototipe adalah sebagai berikut:

$$Z = \frac{V}{I}$$

$$Z = \frac{2,36}{0,75}$$

$$Z = 3,15 \text{ ohm}$$

Hal yang berbeda untuk impedansi total sistem pada massa 69kg dengan metode melompat pada prototipe adalah sebagai berikut

$$Z = \frac{V}{I}$$

$$Z = \frac{7,38}{1,06}$$

$$Z = 6,97 \text{ ohm}$$

Selain itu impedansi total sistem pada massa 98kg dengan metode melompat pada prototipe adalah sebagai berikut

$$Z = \frac{V}{I}$$

$$Z = \frac{5,06}{4,12}$$

$$Z = 1,29 \text{ ohm}$$

Berdasarkan hasil perhitungan impedansi total dari sisi input sistem piezoelektrik, dapat disimpulkan bahwa nilai impedansi bervariasi tergantung pada metode pemberian tekanan dan massa pengguna. Pada metode berjalan melintas prototipe, massa 69 kg menghasilkan impedansi sebesar 10,97 Ω , sedangkan massa 98 kg hanya 3,15 Ω . Sementara itu, pada metode melompat di atas prototipe, massa 69 kg menghasilkan impedansi sebesar 6,97 Ω , dan massa 98 kg menghasilkan impedansi paling rendah sebesar 1,29 Ω . Hal ini menunjukkan bahwa metode melompat, terutama dengan massa yang lebih besar, mampu menurunkan impedansi sistem secara signifikan, yang berarti aliran arus menjadi lebih optimal dan efisiensi penghantaran energi dari piezoelektrik meningkat. Penurunan impedansi ini mengindikasikan performa sistem konversi energi yang lebih baik dalam skenario tekanan dinamis yang tinggi.

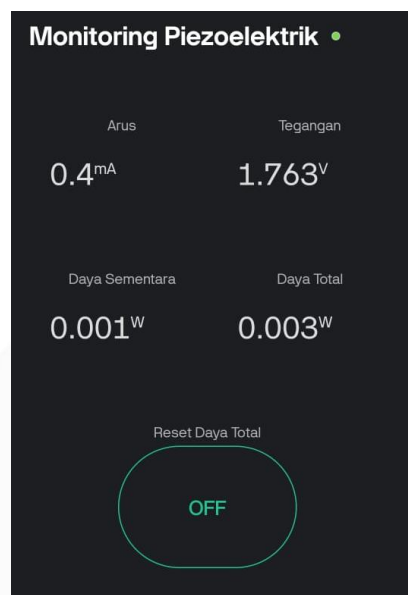
4.7. Implementation

Pada tahap implementasi dilakukan pengujian sistem secara keseluruhan dan membandingkan performanya antara pembacaan menggunakan sensor (integrasi IoT) dan multimeter. Berikut merupakan pengukuran tegangan keluaran kapasitor menggunakan multimeter dan integrasi IoT:

Tabel 4. 39 Data Percobaan Monitoring Tegangan (V) Output Sistem Menggunakan Sensor INA226 Pada Kapasitor 470uF

Jumlah Pijakan	Massa Tubuh		
	Massa 55 kg	Massa 69 kg	Massa 98 kg

	Multi (V)	Blynk (V)	Multi (V)	Blynk (V)	Multi (V)	Blynk (V)
50	2,3	1,7	2,4	1,9	1,9	1,9
100	2,4	1,7	2,5	1,9	2,3	1,9
150	2,3	1,8	2,5	1,8	2,3	2,1
200	2,4	1,7	2,3	1,9	2,4	1,8
250	2,3	2,1	2,5	2,3	2,4	2,6



Gambar 4. 54 Monitoring Realtime Menggunakan Blynk

Pada percobaan monitoring tegangan dan arus menggunakan sensor INA226 yang dikoneksikan ke platform Blynk, dilakukan pengukuran terhadap output dari kapasitor 470 μ F pada tiga variasi massa tubuh (55 kg, 69 kg, dan 98 kg) dan lima tingkat jumlah pijakan (50 hingga 250). Berdasarkan hasil pada Tabel 4.17, secara umum pembacaan tegangan menggunakan multimeter menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan hasil dari sistem Blynk. Tegangan yang tercatat dengan multimeter berada di kisaran 2,3–2,5 V, sedangkan dengan sensor INA226 hanya berkisar antara 1,7–2,4 V. Hal yang serupa juga tampak pada pembacaan arus (Tabel 4.18), di mana multimeter mencatat nilai yang lebih tinggi dan variatif dibandingkan hasil dari Blynk. Nilai arus maksimum dari multimeter mencapai 0,7 mA pada massa tubuh 98 kg, sedangkan sensor INA226 cenderung hanya mencatat nilai maksimum 0,5 mA. Sensor INA226 tampak menunjukkan pola pembacaan

yang lebih datar dan cenderung kurang responsif terhadap fluktuasi yang dihasilkan oleh sistem saat diinjak.

Tabel 4. 40 Data Percobaan Monitoring Arus (mA) Output Sistem Menggunakan Sensor INA226

Jumlah Pijakan	Massa Tubuh					
	Massa 55 kg		Massa 69 kg		Massa 98 kg	
	Multi (mA)	Blynk (mA)	Multi (mA)	Blynk (mA)	Multi (mA)	Blynk (mA)
50	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05
100	0,5	0,4	0,6	0,4	0,7	0,5
150	0,5	0,4	0,5	0,4	0,6	0,5
200	0,6	0,5	0,6	0,4	0,7	0,4
250	4,5	4,3	4,5	4,5	4,7	4,6

Namun, hasil ini berbeda dengan pengujian sebelumnya, di mana sensor INA226 telah dikalibrasi secara manual dan berhasil menunjukkan kesesuaian yang tinggi dengan multimeter saat digunakan untuk membaca arus dan tegangan dari sumber tegangan stabil seperti baterai 5V. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan hasil pengukuran antara sensor INA226 dan multimeter dalam percobaan ini kemungkinan besar disebabkan oleh sifat sinyal keluaran dari sistem piezoelektrik dan kapasitor yang bersifat dinamis, fluktuatif, dan impulsif, bukan karena kesalahan kalibrasi alat. Dengan kata lain, sensor bekerja baik pada sinyal DC yang stabil, namun kurang mampu menangkap karakteristik sinyal yang cepat berubah atau pendek durasinya, seperti halnya output dari sistem injakan.

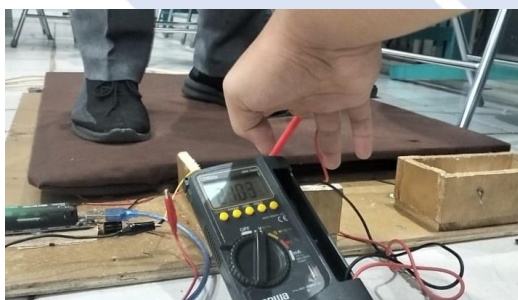
Selain itu juga dilakukan pengukuran untuk melakukan pengecasan pada sebuah baterai 18650 (3,7V 1500 mah) berikut merupakan hasil pengujian untuk pengecasan baterai 18650.

Tabel 4. 41 Pengujian pengecasan baterai 18650 (3,7V 1500mAh) menggunakan massa 69kg

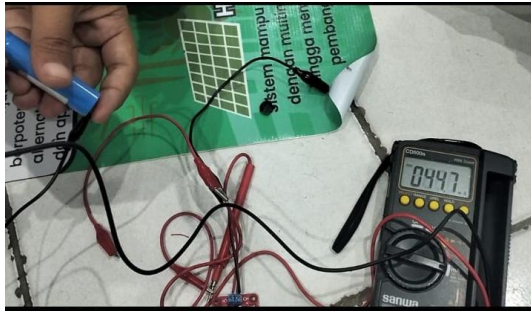
Massa 69kg						
Jumlah Pijakan	Tegangan Kapasitor (V)	Waktu 1 siklus (s)	Arus Masuk ke Baterai (mA)	Tegangan Awal Baterai (V)	Tegangan Akhir Baterai (V)	Tegangan yang Berhasil Diisi (V)
50	12,89V	17 detik	20,4mA	2,388V	2,402V	0,014V
100	18,66V	35 detik	33,0mA	2,425V	2,445V	0,020V
150	21,03V	49 detik	44,7mA	2,485V	2,503V	0,018V



Gambar 4. 55 Pengukuran Tegangan Awal Baterai



Gambar 4. 56 Pengukuran Tegangan Kapasitor

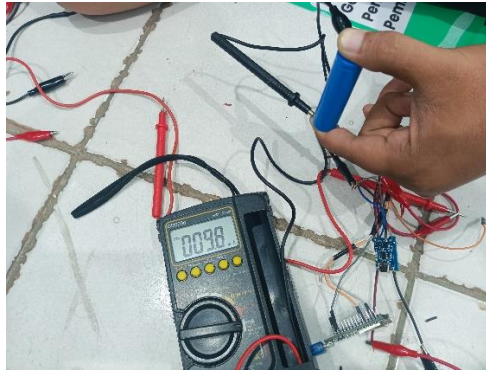


Gambar 4. 57 Pengukuran Arus Pengecasan



Gambar 4. 58 Pengukuran Tegangan Akhir Baterai

Pengujian proses pengecasan baterai 18650 menggunakan sistem piezoelektrik pada massa 69 kg menunjukkan peningkatan performa seiring bertambahnya jumlah pijakan. Pada 50 pijakan dengan waktu 17 detik, sistem mampu menghasilkan tegangan kapasitor sebesar 12,89 V dan arus masuk ke baterai sebesar 20,4 mA, dengan kenaikan tegangan baterai sebesar 0,014 V. Ketika jumlah pijakan ditingkatkan menjadi 100 kali dalam 35 detik, tegangan kapasitor meningkat menjadi 18,66 V dan arus ke baterai mencapai 33,0 mA, menghasilkan peningkatan tegangan baterai sebesar 0,020 V. Pada 150 pijakan dalam 49 detik, tegangan kapasitor mencapai 21,03 V dan arus ke baterai meningkat menjadi 44,7 mA, dengan tambahan tegangan pada baterai sebesar 0,018 V. Secara umum, data ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah pijakan mampu meningkatkan tegangan dan arus dari sistem piezoelektrik, yang secara langsung berdampak pada efisiensi proses pengecasan. Namun, meskipun arus dan tegangan meningkat, selisih tegangan yang diisi ke baterai cenderung kecil, menandakan bahwa waktu dan intensitas pijakan masih menjadi faktor penting untuk meningkatkan efektivitas pengisian daya.



Gambar 4. 59 Pengukuran Arus Balik Baterai

Arus balik dari baterai ke rangkaian adalah 9,8 mA oleh karena itu diperlukan arus di atas 9,8 mA untuk dapat melakukan pengisian pada baterai 1865, selain itu berdasarkan data pengujian di atas dapat dihitung waktu yang diperlukan untuk melakukan pengisian baterai 18650 (3,7 V 1500mAh) menggunakan perhitungan di bawah ini:

Pengujian 1 (50 pijakan, waktu 17 detik (per siklus)):

$$Waktu\ Hitung = \frac{Kapasitas\ Baterai}{Arus}$$

$$Waktu\ Hitung = \frac{1500}{20,4}$$

$$Waktu\ Hitung = 73,53\ jam = 264.708\ detik$$

Pengujian 2 (100 pijakan, waktu 35 detik (per siklus)):

$$Waktu\ Hitung = \frac{Kapasitas\ Baterai}{Arus}$$

$$Waktu\ Hitung = \frac{1500}{33}$$

$$Waktu\ Hitung = 45,45\ jam = 163.620\ detik$$

Pengujian 3 (150 pijakan, waktu 49 detik (per siklus)):

$$Waktu\ Hitung = \frac{Kapasitas\ Baterai}{Arus}$$

$$Waktu\ Hitung = \frac{1500}{44,7}$$

$$Waktu\ Hitung = 33,56\ jam = 120.816\ detik$$

Dikarenakan setiap siklus mewakili 0,685ms setiap waktu pengecasan yang sebenarnya maka waktu pengecasan yang dibutuhkan berdasarkan pengujian 1, 2 dan 3 adalah sebagai berikut:

$$Waktu\ Pengecasan\ Nyata = \frac{Waktu\ Hitung}{Waktu\ Pengecasan\ per\ Siklus} \times Waktu\ per\ Siklus$$

Pengujian 1:

$$Waktu\ Pengecasan\ Nyata = \frac{264.708}{0,685} \times 17$$

$$Waktu\ Pengecasan\ Nyata = 386.435 \times 17$$

$$Waktu\ Pengecasan\ Nyata = 6.569.395\ detik = 76,035\ hari$$

Pengujian 2:

$$Waktu\ Pengecasan\ Nyata = \frac{163.620}{0,685} \times 35$$

$$Waktu\ Pengecasan\ Nyata = 238.861 \times 35$$

$$Waktu\ Pengecasan\ Nyata = 8.360.145\ detik = 96,761\ hari$$

Pengujian 3:

$$Waktu\ Pengecasan\ Nyata = \frac{120.816}{0,685} \times 49$$

$$Waktu\ Pengecasan\ Nyata = 176.373 \times 49$$

$$Waktu\ Pengecasan\ Nyata = 8.642.312\ detik = 100,027\ hari$$

Perhitungan estimasi waktu pengecasan baterai menunjukkan bahwa sistem membutuhkan durasi yang sangat panjang untuk dapat mengisi baterai secara penuh. Berdasarkan arus masuk pada masing-masing pengujian, waktu pengisian ideal tanpa mempertimbangkan efisiensi dan kerugian sistem berkisar antara 33

hingga 73 jam. Namun, ketika mempertimbangkan siklus aktual dan rasio waktu siklus terhadap waktu total, maka waktu pengecasan nyata menjadi jauh lebih besar, yaitu antara 76 hingga 100 hari. Hal ini menandakan bahwa meskipun sistem piezoelektrik mampu menghasilkan energi listrik, diperlukan peningkatan efisiensi baik dari sisi konversi energi, penyimpanan, hingga integrasi rangkaian penguat atau pengatur daya agar sistem lebih praktis dan efisien dalam aplikasi nyata.

4.8. Analysis

Pengujian yang dilakukan terhadap berbagai konfigurasi piezoelektrik menunjukkan bahwa setiap konfigurasi memiliki karakteristik output yang berbeda terhadap variasi tekanan. Dari empat konfigurasi utama yang diuji seri-seri, paralel-paralel, seri-paralel, dan paralel-seri. Konfigurasi paralel-paralel terbukti paling efektif dalam menghasilkan arus, yang menjadi parameter utama dalam aplikasi pengisian baterai. Meskipun konfigurasi seri-seri menghasilkan tegangan lebih tinggi, arus yang dihasilkan relatif rendah. Oleh karena itu, konfigurasi paralel-paralel dipilih sebagai basis untuk pengembangan prototipe lanjutan, karena mampu memberikan aliran arus yang lebih besar dan stabil.

Selanjutnya, pengujian terhadap sembilan blok piezoelektrik dilakukan dengan menggunakan dua massa berbeda, yakni 69 kg dan 98 kg, untuk mensimulasikan variasi beban manusia. Dari hasil pengujian, diketahui bahwa sebagian besar blok menunjukkan performa yang cukup baik, dengan output arus dan tegangan yang signifikan. Namun, blok 4 menunjukkan performa yang sangat rendah dengan rata-rata arus dan tegangan jauh di bawah standar minimum untuk aplikasi pengisian daya. Oleh sebab itu, blok ini tidak dilibatkan dalam perakitan sistem utama. Sementara itu, blok-blok seperti blok 1, 5, dan 8 menunjukkan performa tertinggi dan konsisten baik pada massa ringan maupun berat.

Dari metode pembebanan, dua pendekatan diterapkan, yaitu berjalan melintas dan melompat di atas prototipe. Analisis hasil menunjukkan bahwa metode melompat menghasilkan output energi yang jauh lebih besar dibandingkan metode berjalan. Hal ini ditunjukkan dengan nilai tegangan dan arus rata-rata yang lebih tinggi secara konsisten, terutama pada konfigurasi paralel-paralel dengan 128

elemen piezoelektrik. Kombinasi antara metode melompat dan massa pengguna yang lebih berat terbukti menjadi kondisi paling optimal dalam mengekstrak energi dari sistem piezoelektrik.

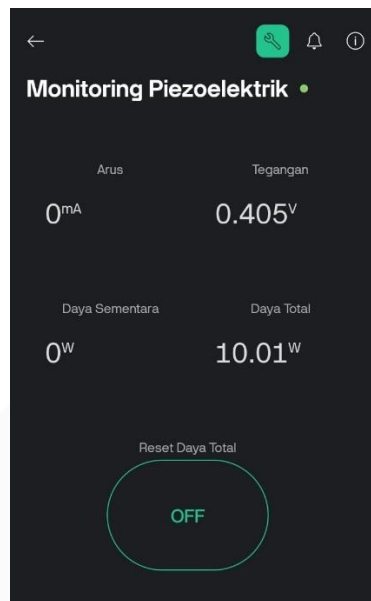
Setelah dilakukan pengujian output langsung, tahap selanjutnya adalah pengukuran tegangan dan arus AC yang dihantarkan ke rangkaian pengecasan sebelum proses penyearahan. Nilai yang diperoleh tetap menunjukkan pola yang sama, di mana massa lebih besar dan metode melompat menghasilkan arus dan tegangan yang lebih tinggi. Berdasarkan perbandingan nilai tegangan terhadap arus pada tahap ini, dihitung pula impedansi total sistem. Nilai impedansi paling rendah diperoleh saat massa 98 kg dengan metode melompat (1,29 ohm), menandakan efisiensi penghantaran daya tertinggi pada skenario tersebut.

Untuk melengkapi data numerik, pengamatan menggunakan osiloskop dilakukan guna mengamati bentuk gelombang dan frekuensi sinyal dari sistem piezoelektrik. Dari hasil tampilan gelombang, diketahui bahwa bentuk sinyal yang dihasilkan bersifat transien dengan puncak-puncak tegangan yang signifikan, terutama saat lompatan terjadi. Frekuensi sinyal juga bervariasi, dengan nilai tertinggi tercatat pada massa 69 kg dengan metode melintas (sekitar 186 Hz), dan terendah saat massa 98 kg melompat (sekitar 61 Hz). Data ini memberikan pemahaman lebih dalam mengenai sifat dinamis sistem piezoelektrik.

Akhirnya, sistem diuji dalam konteks aplikatif melalui proses pengecasan baterai lithium-ion 18650 (3,7V 1500 mAh). Meskipun arus pengisian yang masuk relatif kecil, yaitu sekitar 20 mA sampai 44 mA, proses ini menunjukkan adanya peningkatan tegangan baterai secara bertahap setelah sejumlah pijakan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem piezoelektrik yang dikembangkan tidak hanya mampu menghasilkan energi, namun juga mentransfer dan menyimpan energi ke perangkat eksternal secara fungsional.

Secara keseluruhan, hasil-hasil pengujian mengindikasikan bahwa sistem piezoelektrik dengan konfigurasi paralel-paralel memiliki potensi nyata untuk digunakan sebagai sumber energi alternatif berbasis tekanan. Efektivitas sistem

sangat bergantung pada gaya tekan (massa dan metode pijakan), serta desain konfigurasi dan kapasitas penyimpanan. Analisis ini menjadi dasar yang kuat untuk pengembangan lebih lanjut ke arah integrasi penuh dengan sistem monitoring dan penyimpanan berbasis IoT.



Gambar 4. 60 Monitoring Daya Menggunakan Blynk

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Sistem ini dikembangkan menggunakan metode Research and Development (R&D) dan melibatkan empat kombinasi konfigurasi piezoelektrik: seri-seri, seri-paralel, paralel-seri, dan paralel-paralel untuk mengetahui karakteristik dan performa dari masing-masing konfigurasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa masing-masing konfigurasi memiliki karakteristik berbeda, yang sangat bergantung pada kebutuhan aplikatif. Konfigurasi paralel-paralel menunjukkan kinerja paling baik dari sisi arus, dengan rata-rata arus tertinggi sebesar 12,26 mA dan tegangan 9,82 V, menjadikannya pilihan paling ideal untuk aplikasi pengisian daya baterai, karena pengisian lebih bergantung pada arus.

2. Berdasarkan pengujian performa sistem terhadap dua variasi massa tubuh (69 kg dan 98 kg), ditemukan bahwa semakin besar massa pengguna, semakin tinggi pula output tegangan dan arus sistem. Hal ini membuktikan bahwa besarnya gaya tekan sangat berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan piezoelektrik, sejalan dengan penelitian oleh Hidayatullah et al. (2016). Dalam simulasi penggunaan nyata, dua metode pengujian diterapkan yaitu melintas dan melompat di atas prototipe. Hasil menunjukkan bahwa melompat menghasilkan output yang jauh lebih tinggi, baik dari segi tegangan maupun arus. Misalnya, pada massa 98 kg dengan metode melompat, sistem menghasilkan nilai rata-rata 8,9 V dan 11,67 mA, sedangkan saat berjalan hanya mencapai 5,44 V dan 1,26 mA. Selain itu perhitungan impedansi sistem juga memperkuat hal ini, yaitu impedansi terendah (1,29 ohm) ditemukan pada kondisi melompat dengan massa 98 kg, menandakan bahwa kondisi tersebut paling optimal dalam menghantarkan energi ke rangkaian pengecasan. Setelah itu perhitungan teoritis memperkirakan waktu pengisian penuh (dari 0 hingga 1500 mAh) sebagai berikut:

- Dengan arus 20,4 mA membutuhkan waktu 73,53 jam
- Dengan arus 33,0 mA membutuhkan waktu 45,45 jam

- Dengan arus 44,7 mA membutuhkan waktu 33,56 jam

Namun setelah dikalibrasi dengan waktu siklus aktual berdasarkan kecepatan pijakan (0,685 detik per siklus), waktu pengisian nyata menjadi sangat panjang, berkisar antara 76 hingga 100 hari, menandakan perlunya peningkatan efisiensi sistem.

3. Sinyal AC yang dihasilkan sistem juga diamati menggunakan osiloskop. Frekuensi sinyal bervariasi tergantung intensitas tekanan, antara 3 Hz hingga 9 Hz, dengan bentuk gelombang tidak beraturan, menandakan bahwa beban sistem dan gaya tekan berpengaruh pada kestabilan sinyal output. Setelah penyearahan dan penyimpanan sementara menggunakan kapasitor $470\ \mu\text{F} + 1\ \mu\text{F}$, sinyal DC dapat digunakan untuk proses pengisian baterai melalui TP4056 serta pemantauan sistem menggunakan sensor INA226 dan platform IoT Blynk menunjukkan potensi positif, namun belum optimal.

4. Secara keseluruhan, sistem piezoelektrik konfigurasi paralel-paralel dengan integrasi TP4056 sebagai pengatur pengisian daya telah berhasil menunjukkan konsep pengisian baterai berbasis energi tekanan dari pijakan kaki manusia. Meski waktu pengisian penuh masih tergolong sangat lama, penelitian ini telah membuka ruang eksplorasi lebih lanjut terhadap integrasi sistem piezoelektrik sebagai sumber energi alternatif skala kecil.

5.2. Saran

1. Sebagai arah pengembangan lanjutan, terdapat beberapa strategi teknis yang dapat diterapkan guna meningkatkan efektivitas dan efisiensi sistem piezoelektrik dalam aplikasi nyata. Pertama, disarankan untuk mengganti baterai 18650 berkapasitas 1500 mAh dengan baterai berkapasitas lebih kecil sehingga waktu yang dibutuhkan untuk mencapai tegangan penuh akan jauh lebih singkat. Pendekatan ini penting karena karakteristik piezoelektrik secara umum lebih cocok untuk aplikasi penyimpanan energi mikro, mengingat keterbatasannya dalam menghasilkan arus besar secara kontinu.

2. Selanjutnya, peningkatan jumlah elemen piezoelektrik dalam konfigurasi murni paralel-paralel menjadi langkah strategis, karena konfigurasi ini terbukti paling optimal dalam menghasilkan arus, yang merupakan parameter utama dalam pengisian baterai.

3. Aspek lain yang perlu mendapat perhatian adalah perancangan desain mekanis yang lebih kokoh dan responsif, misalnya dengan penggunaan pelat distribusi tekanan berbahan material logam tipis di atas piezoelektrik, sehingga tekanan dari langkah kaki dapat tersebar merata dan tertangkap lebih efisien oleh seluruh elemen piezoelektrik. Desain mekanis semacam ini juga dapat meningkatkan durabilitas sistem terhadap tekanan berulang dan memperpanjang umur pakai elemen piezoelektrik. Selain itu meningkatkan kecerdasan sistem melalui pendekatan monitoring dan kontrol berbasis *Internet of Things (IoT)* juga perlu dirancang sedemikian rupa agar tidak mengganggu performa piezoelektrik dalam proses pengecasan. Hal ini dikarenakan dalam sistem piezoelektrik, beban tambahan sekecil apa pun termasuk dari sensor dan mikrokontroler dapat mempengaruhi efisiensi konversi energi, karena sifat piezoelektrik yang sensitif terhadap beban listrik. Dengan perancangan sistem IoT yang lebih adaptif dan responsif tersebut, maka proses pengisian daya dapat dikendalikan dengan lebih cerdas tanpa mengorbankan efisiensi energi dari piezoelektrik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suratha, I. K. (2014). Dampak alih fungsi lahan pertanian terhadap ketahanan pangan. *Media Komunikasi Geografi*, 15(2).
- [2] Ariyanto, A. A., & Ansori, A. (2019). PENGARUH PENGGUNAAN BEBAN TERHADAP PERFORMA PEMBANGKIT LISTRIK HYBRID BERBASIS SOLAR CELL DAN FUEL CELL. *Jurnal Teknik Mesin*, 7(2).
- [3] Setiartiti, L., & Al-Hasibi, R. A. (2024). Monograf: Transisi Energi Terbarukan Untuk Pembangunan Berkelanjutan. Penerbit P4I.
- [4] Afriyanti, Y., Sasana, H., & Jalunggono, G. (2020). Analisis faktor-faktor yang mempengaruhi konsumsi energi terbarukan di Indonesia. *DINAMIC: Directory Journal of Economic*, 2(3), 865-884.
- [5] Boka, I. R. Y., Situmorang, M. T. N., Paharuddin, S. T., Oka, P. A. K. M., Soeryamassoeka, S. B., Rumawak, S. A., ... & SP, M. S. (2024). Pengantar Teknik lingkungan. Cendikia Mulia Mandiri.
- [6] Herindrasti, S., Angelina, B., & Putriwinata, P. (2024). Pengembangan Kebijakan Energi Terbarukan Di Indonesia, Vietnam, Dan Laos. *Sospol*, 10(2), 154-172.
- [7] Mahendra, G. S., Judijanto, L., Tahir, U., Nugraha, R., Dwipayana, A. D., Nuryanneti, I., ... & Rakhmadani, D. P. (2024). *Green Technology: Panduan Teknologi Ramah Lingkungan*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- [8] Silalahi, E. M. (2025). PERANCANGAN PROTOTYPE PEMBANGKIT PIEZOELEKTRIK LANTAI UNTUK SUPLAI ENERGI LISTRIK LAMPU PENERANGAN PINTU MASUK RUMAH. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(1).
- [9] Mowaviq, M. I., Junaidi, A., & Purwanto, S. (2018). Lantai permanen energi listrik menggunakan piezoelektrik. *Energi & Kelistrikan*, 10(2), 112-118.
- [10] Howells, C. A. (2009). Piezoelectric energy harvesting. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1847-1850.
- [11] Taufani, M. R. (2023). *Teknologi Ramah Lingkungan*. Nuansa Cendekia..
- [12] Azizi, D., & Arinal, V. (2023). Sistem Monitoring Daya Listrik Menggunakan Internet Of Thing (Iot) Berbasis Mobile. *Jurnal Indonesia: Manajemen Informatika dan Komunikasi*, 4(3), 1808-1813.
- [13] Li, T., & Lee, P. S. (2022). Piezoelectric energy harvesting technology: from materials, structures, to applications. *Small Structures*, 3(3), 2100128.
- [14] BJUltrasonic. (n.d.). How much voltage does a piezoelectric sensor generate? Retrieved March 28, 2025, from <https://www.bjultrasonic.com/how-much-voltage-does-a-piezoelectric-sensor-generate/>

- [15] Sun, Y., Hieu, N. H., Jeong, C. J., & Lee, S. G. (2011). An integrated high-performance active rectifier for piezoelectric vibration energy harvesting systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(2), 623-627.
- [16] Wijaya, R. D., Wahyudi, A., Aditya, F. V., Ardafans, F. Y. V., & Pratama, Y. (2025). Rancang Bangun Charger Berbasis PLTS. *Jurnal Ilmu Ekonomi, Pendidikan dan Teknik*, 2(4), 71-76.
- [17] Pane, U. F. S. S., & Andriyani, I. A. (2024). Sistem pendeteksi kualitas air pada budidaya ikan air tawar berbasis internet of things (IoT). *Jurnal Teknologi Sistem Informasi dan Sistem Komputer TGD*, 7(1), 84-94.
- [18] PT Ozami Inti Sinergi. (2024). Mengenal ESP32, Mikrokontroler IoT. Diakses dari <https://ozami.co.id/mengenal-esp32-mikrokontroler-iot/>.
- [19] Naufal, A. (2025). RANCANGAN MONITORING BATTERY CHARGING PERALATAN GLIDE PATH SELEX SI-2100 MENGGUNAKAN NODEMCU BERBASIS APLIKASI ANDROID. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(1).
- [20] Irvani, A. I., Inayah, I., Muhammad Rohfadli, S. T., Alkadri, Y., Roihan, M., Andaria, A. C., ... & Hanam, E. S. (2025). *Dasar-Dasar Elektronika*. MEGA PRESS NUSANTARA.
- [21] Aydin, A. C., & Çelebi, O. (2023). Piezoelectric materials in civil engineering applications: A review. *ACS Omega*, 8(22), 19168–19193.
- [22]. Ramadhan, M. R., Sasmono, S., & Ekaputri, C. (2021). Perancangan prototipe konversi hybrid energi suara, energi tekanan dan energi angin menjadi energi listrik menggunakan komponen piezoelektrik. *e-Proceeding of Engineering*, 8(5), 4447–4457.
- [23] Physics Forums. (2016, July 3). Why does piezoelectric output voltage dropped when load is added? Retrieved March 28, 2025, from <https://www.physicsforums.com/threads/why-does-piezoelectric-output-voltage-dropped-when-load-is-added.857433>
- [24] Lefevvre, E., Badel, A., Richard, C., & Guyomar, D. (2005). Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(10), 865–876. <https://doi.org/10.1177/1045389X05056859>
- [25] Endang, E., & Ikrogem, M. (2020). Perancangan sistem penerangan lampu dengan teknologi piezoelektrik PZT di Fakultas Teknik Universitas Riau Kepulauan. *Sigma Teknika*, 3(1), 50–60.
- [26] Hidayatullah, W., Syukri, M., & Syukriyadin. (2016). Perancangan prototype penghasil energi listrik berbahan dasar piezoelektrik. *KITEKTRO: Jurnal Online Teknik Elektro*, 1(3), 63–67.

[27] Stiawan, E., & Taufiq, A. J. (2020). Rancang bangun alat pemanen energi listrik dari tekanan mekanik berbasis piezoelektrik. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, 2(2), 79–84.



LAMPIRAN

Lampiran 1. 1 Daftar Riwayat Hidup



DAFTAR RIWAYAT HIDUP

1. Data Pribadi

Nama Lengkap : Bram Tirta
Tempat Tanggal Lahir : Pangkal Pinang, 4 Maret 2004
Alamat Rumah : Perumahan Bumi Arwana Indah
No. Hp : 085783129893
Email : tirtabram45@gmail.com
Jenis Kelamin : Laki-laki
Agama : Islam



2. Riwayat Pendidikan

- | | |
|---|------------------|
| a. SDN Marunda 02 Pagi | Lulus 2016 |
| b. SMPN 2 Pringsewu | Lulus Tahun 2019 |
| c. SMAN 1 Pringsewu | Lulus Tahun 2022 |
| d. Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung | 2022 – Sekarang |

3. Pengalaman Kerja

- a. Peserta Kampus Mengajar Angkatan 8 Tahun 2024

Sungailiat, 3 Juli 2025

Bram Tirta

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

1. Data Pribadi

Nama Lengkap : Gerhana
Tempat Tanggal Lahir : Belinyu, 27 Oktober 2002
Alamat Rumah : Kp. Pulau Punai
No. Hp : 085788919276
Email : gerhanaa674@gmail.com
Jenis Kelamin : Laki-laki
Agama : Islam



2. Riwayat Pendidikan

- | | |
|---|------------------|
| a. SDN 6 Belinyu | Lulus 2015 |
| b. SMPN 1 Belinyu | Lulus Tahun 2018 |
| c. SMK YPN Belinyu | Lulus Tahun 2021 |
| d. Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung | 2022 – Sekarang |

3. Pengalaman Kerja

- a. Praktik Kerja Lapangan di Bengkel Redi CV Sumber Jadi
- b. Praktik Kerja Lapangan di PLTD Belinyu

Sungailiat, 3 Juli 2025

Gerhana

LAMPIRAN

Lampiran 2. 1 Program Monitoring



```

#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL6657X96uf"

#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Monitoring Piezoelektrik"

#define BLYNK_AUTH_TOKEN "hTWm17QD4CQj-oMJdEhcpMd-iytoRSSW"


#include <WiFi.h>

#include <BlynkSimpleEsp32.h>

#include <Wire.h>

#include <INA226_WE.h>


// Objek sensor INA226 dengan alamat default (0x40)
INA226_WE ina226(0x40);


// Konfigurasi WiFi
char ssid[] = "Piezoelektrik";
char pass[] = "jayajaya";
BlynkTimer timer;
float daya_total = 0; // Total daya (Watt)


void sendToBlynk() {
    float voltage = ina226.getBusVoltage_V(); // Tegangan (V)
    float current = ina226.getCurrent_mA();    // Arus (mA)
    float power = (voltage * current) / 1000.0; // Daya sementara (W)
    daya_total += power;                        // Akumulasi daya total (W)


    // Kirim ke Blynk
    Blynk.virtualWrite(V1, current); // Arus (mA)
    Blynk.virtualWrite(V2, voltage);  // Tegangan (V)

```

```

Blynk.virtualWrite(V3, power);    // Daya sementara (W)
Blynk.virtualWrite(V4, daya_total); // Daya total (W)

// Tampilkan di Serial Monitor juga
Serial.print("Tegangan (V): ");
Serial.print(voltage);
Serial.print(" | Arus (mA): ");
Serial.print(current);
Serial.print(" | Daya Sementara (W): ");
Serial.print(power);
Serial.print(" | Daya Total (W): ");
Serial.println(daya_total);
}

// Reset daya total via tombol V0
BLYNK_WRITE(V0) {
    daya_total = 0;
    Serial.println("Daya total direset via Blynk (V0)");
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Wire.begin();

    ina226.init(); // Inisialisasi INA226

    // Hubungkan ke WiFi dan Blynk

```

```
Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, ssid, pass);

// Kirim data setiap 1 detik
timer.setInterval(1000L, sendToBlynk);
}

void loop() {
  Blynk.run();
  timer.run();
}
```



LAMPIRAN

Lampiran 3. 1 Dokumentasi Pengerjaan Keseluruhan





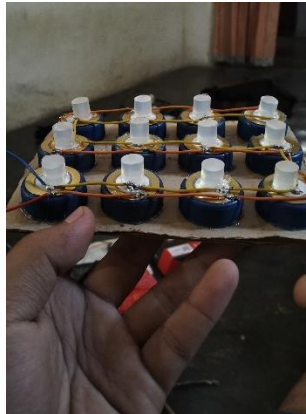
Gambar Lampiran 3. 1 Pelubangan Tutup Botol



Gambar Lampiran 3. 2 Pemasangan Piezoelektrik ke Tutup Botol



Gambar Lampiran 3. 3 Pemasangan Piezoelektrik ke Alas



Gambar Lampiran 3. 4 Prototipe Awal



Gambar Lampiran 3. 5 Proses Penyolderan



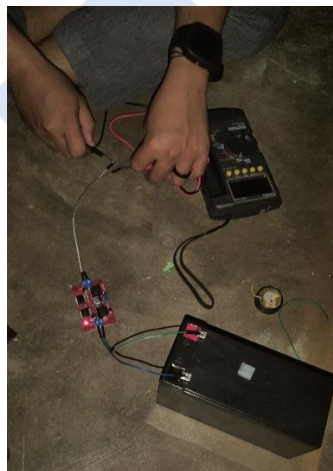
Gambar Lampiran 3. 6 Proses Pengukuran dan Pemotongan Triplek



Gambar Lampiran 3. 7 Proses Pemilokan Triplek



Gambar Lampiran 3. 8 Proses Kalibrasi Sensor



Gambar Lampiran 3. 9 Proses Setting Output Buckboost



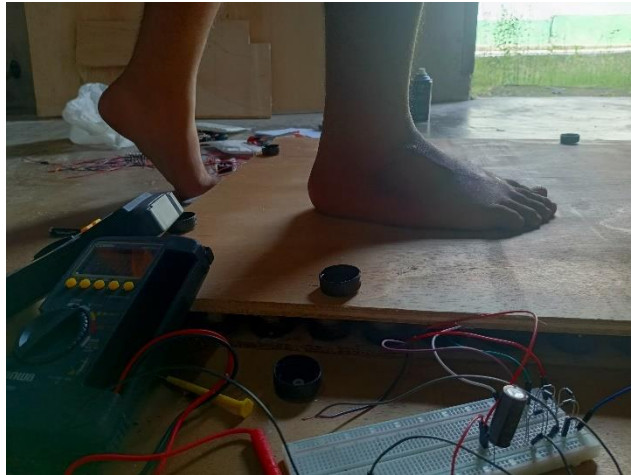
Gambar Lampiran 3. 10 Proses Penempelan Konfigurasi piezoelektrik ke Alas



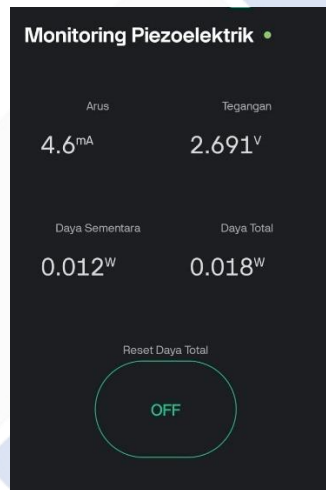
Gambar Lampiran 3. 11 Proses Pemotongan Lem Lilin



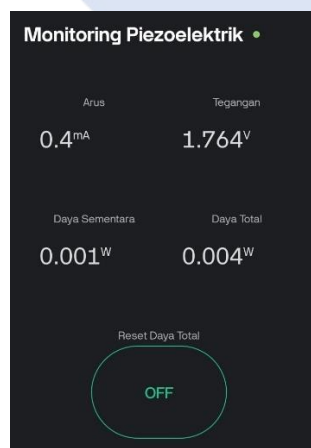
Gambar Lampiran 3. 12 Proses Penempelan Lem Lilin



Gambar Lampiran 3. 13 Proses Pengujian Sistem Keseluruhan



Gambar Lampiran 3. 14 Monitoring Pada Blynk



Gambar Lampiran 3. 15 Monitoring Pada Blynk

TURNITIN_BRAM_TIRTA_DAN_GERHANA_MAKALAH_PROYEK_...
1753260678649

ORIGINALITY REPORT

6%

SIMILARITY INDEX

5%

INTERNET SOURCES

1%

PUBLICATIONS

0%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

ejurnal.undana.ac.id

Internet Source

1%

2

edoc.pub

Internet Source

<1%

3

Eva Magdalena Silalahi. "PERANCANGAN
PROTOTYPE PEMBANGKIT PIEZOELEKTRIK
LANTAI UNTUK SUPLAI ENERGI LISTRIK
LAMPU PENERANGAN PINTU MASUK
RUMAH", Jurnal Informatika dan Teknik
Elektro Terapan, 2025

Publication

<1%

4

repository.its.ac.id

Internet Source

<1%

5

repository.ub.ac.id

Internet Source

<1%

6

123dok.com

Internet Source

<1%

SURAT PERNYATAAN

Saya/Kami yang bertandatangan dibawah ini telah menyelesaikan Proyek Akhir yang berjudul:

Pembangkit Listrik menggunakan Piezoelektrik Dengan Memanfaatkan Tekanan Dari Pijakan Kaki manusia Pada Lantai

Oleh :

1. Bram Tirta /NPM 1052234
2. Gerhana /NPM 1052239
3. /NPM

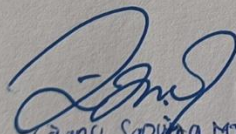
Dengan ini menyatakan bahwa isi laporan akhir proyek akhir sama dengan *hardcopy*.
Demikian surat pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya.

Sungailiat, Agustus 2025

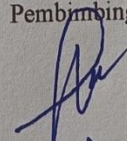
1. Bram Tirta (BW)
2. Gerhana (GN)
3. (.....)

Mengetahui,

Pembimbing 1,


(Zanli Saputra M.Ts.T)

Pembimbing 2,


(Pepi'zan, M. Pd. T)