Jurnal Fakultas Teknik
Universitas Muhamadiyah Parepare
Vol. xx No. xx, Bulan 20xx

STUDI EKSPERIMENTAL PERBANDINGAN ENERGI LUARAN PIEZOELEKTRIK DALAM RANGKAIAN SERI DAN PARALEL

Febrian[1], Muhammad Basri[2], A.Irmayani Pawelloi[3]

[1,2,3]Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Parepare, Indonesia
**Email :* ryanfebrian484@gmail.com

Abstract: Piezoelectric sensors are devices that can generate electrical energy from mechanical pressure or vibration, but the energy generated is relatively small and highly dependent on the strength and consistency of the pressure applied. This study aims to determine the most optimal configuration of piezoelectric sensor circuits in generating voltage, current, and electrical power so that it can be determined whether piezoelectric sensors can be used as the main energy source. Tests were carried out on one piezoelectric sensor with varying loads as a reference in the experiment, then comparing series and parallel configurations, with varying numbers of sensors. In series and parallel configurations, tests were carried out on 2 to 9 sensors, while the parameters observed included voltage, current, and maximum, minimum, and average power generated from each configuration. Tests were carried out by applying mechanical pressure in the form of blows to each circuit. The test results showed that testing one sensor with a load of 330 Ω produced a voltage (1,14–1,69 V), and a current (3,42–5,09 mA); while the series circuit configuration produced a maximum power of (3,75 mW), a minimum (1,48 mW), and an average (2,404 mW); Meanwhile, the maximum power of the parallel circuit configuration is (3,57 mW), minimum (0,85 mW), and average (1,14 mW). The experimental results show that the series circuit configuration is more effective in producing electrical energy than the parallel configuration, although the energy produced is still relatively low.

Keywords: Piezoelectric Sensor; Electrical Energy; Pressure; Circuit Configuration; Measurement

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi sensor semakin pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan sistem yang efisien, hemat energi, dan ramah lingkungan. Salah satu teknologi yang mendapat perhatian luas dalam dekade terakhir adalah sensor piezoelektrik (Parung, J dkk., 2021). Sensor ini bekerja berdasarkan efek piezoelektrik, yaitu kemampuan suatu material untuk menghasilkan muatan listrik ketika mengalami tekanan mekanik. Fenomena ini pertama kali ditemukan oleh Pierre dan Jacques Curie pada tahun 1880 (Fitriani, F dkk.,2023).Piezoelektrik adalah sebuah komponen elektronika yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik atau sebaliknya berdasarkan efek piezoelektrik (Ashara, S. M. 2023).

Piezoelektrik merupakan sistem yang terdiri dari bahan material tertentu yang akan menghasilkan tegangan listrik akibat tekanan atau kekuatan mekanik yang diberikan pada kedua bidang (Hasibuan, J. A dkk., 2021). Efek piezoelektrik ini akan menghasilkan kemampuan suatu benda material tertentu untuk bergetar ketika diberikan tegangan listrik. Namun sebaliknya ketika pada bidang material tersebut diberikan tekanan

tertentu, maka dari material tersebut akan menghasilkan tegangan listrik (Talantan, D. Y. P. 2024).

Namun demikian, salah satu tantangan utama dalam pemanfaatan sensor piezoelektrik sebagai sumber energi adalah rendahnya daya listrik yang dihasilkan (Harahap, M. D., & Su'aidy, K. I. 2024). Oleh karena itu, penelitian yang fokus pada karakterisasi besaran tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan sangat penting untuk menentukan kelayakan penggunaan sensor ini dalam aplikasi praktis (Zarkasyi, M. 2024). Pengukuran parameter-parameter tersebut dapat memberikan gambaran tentang efisiensi konversi energi dan optimasi desain sistem pemanen energi piezoelektrik (Putra, I. D. G. A. T dkk., 2024). Penerapan teknologi dalam menghasilkan energi listrik melalui pemanfaatan piezoelektrik sebagai sumber energi listrik alternatif telah dilakukan oleh berbagai peneliti (Ade, R. H. 2020).

Adapun penelitian mengenai Analisis Daya Piezoelektrik Model Hybrid Solar Cell-Piezoelektric Skala Rendah dimana penelitian ini memanfaatkan frekuensi untuk mengetahui seberapa besar daya yang dihasilkan piezoelektrik (Diniardi, E dkk., 2018).Salah satu contohnya dengan memanfaatkan energi kinetik dari gerakan kaki. Komponen yang mampu mengubah energi kinetik menjadi energi listrik adalah piezoelektrik (HD, N. K., & Rifaldi, S. 2022).Salah satu penelitian yang menjadi dasar yang akan dilakukan ini memanfaatkan metode eksperimen dengan menggunakan tekanan pijakan kaki pada sensor piezoelektrik sebagai variabel independen (Wardianto,Wikra.2024).

Penelitian ini berfokus pada analisis tegangan, arus, dan daya murni yang dihasilkan oleh sensor piezoelektrik tanpa penggunaan komponen pendukung tambahan. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban berupa resistor sebesar 100 kΩ serta mengukur langsung keluaran tegangan dan arus menggunakan multimeter. Sensor piezoelektrik disusun dalam konfigurasi seri dan paralel dengan jumlah sensor yang bervariasi, Setiap konfigurasi rangkaian akan diberikan tekanan berupa pukulan sebanyak sepuluh kali, kemudian hasil keluarannya dianalisis untuk mengetahui karakteristik listrik yang dihasilkan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

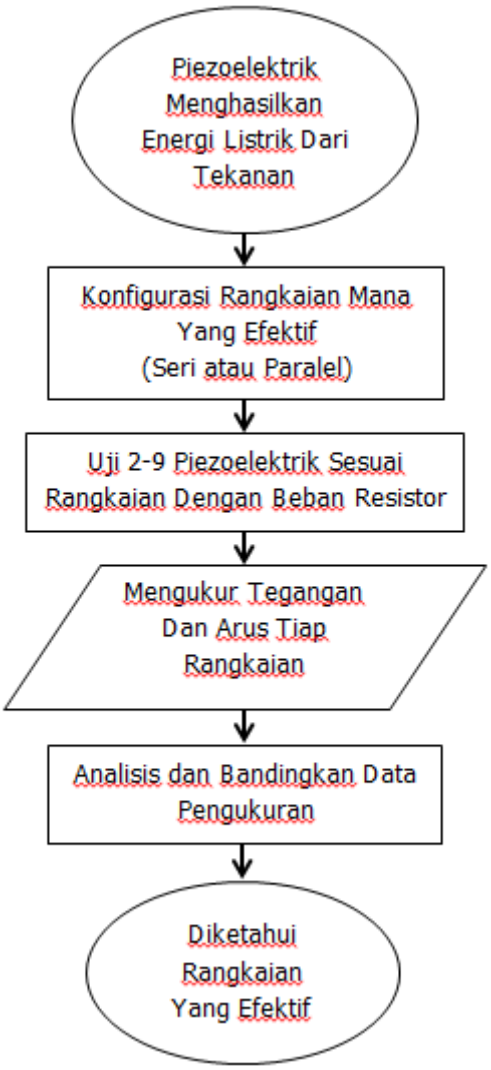
Penelitian ini dilaksanakan di Kota Parepare, Sulawesi Selatan, dengan lokasi uji coba pengambilan data dilakukan di universitas Muhammadiyah parepare .Waktu pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan Maret hingga, juni 2025.

2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen rekayasa teknologi dengan pendekatan kuantitatif. Penelitian bertujuan untuk studi eksperimental perbandingan energi keluaran rangkaian piezoelektrik seri, paralel dan kombinasi dalam merespon eksitasi getaran.

2.2 Rancangan Penelitian

Eksperimen ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sensor piezoelektrik dalam menghasilkan energi listrik melalui sepuluh kali pukulan berulang. Pengujian difokuskan pada perbandingan nilai tegangan dan arus keluaran pada rangkaian seri dan paralel, dengan tujuan untuk menentukan rangkaian yang lebih efektif dalam menghasilkan energi listrik. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan menilai potensi sensor piezoelektrik sebagai sumber energi listrik skala mikro.



Gambar 1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini bertujuan menjelaskan mekanisme kerja sensor piezoelektrik dalam menghasilkan energi listrik serta membandingkan efektivitas konfigurasi seri dan paralel untuk menentukan rangkaian yang lebih optimal. Rancangan penelitian ini menjelaskan mekanisme kerja piezoelektrik dalam menghasilkan energi listrik melalui variasi jumlah piezoelektrik dan beban, sehingga memungkinkan perbandingan keluaran energi pada setiap rangkaian.

2.3 Bahan dan Alat Penelitian

Bahan utama dan alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: Sensor Piezoelektrik, Multimeter, Resistor, timah, solder, alat pukul, dan bantalan karet.

2.4 Prosedur Penelitian

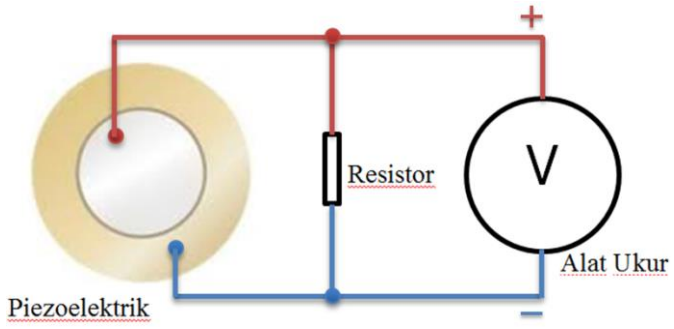
Prosedur penelitian dimulai dengan menguji satu buah sensor piezoelektrik dengan beban yang berbeda-beda kemudian merancang dan merakit sensor piezoelektrik 2 hingga 9 buah dalam bentuk rangkain seri dan paralel dengan beban yang tetap, dan dilakukan pengukuran tegangan dan arus keluaran yang dihasilkan oleh sensor piezoelektrik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

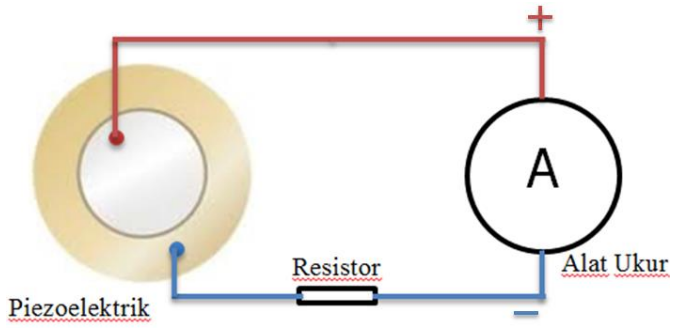
3.1. Hasil Perancangan dan Implementasi Penelitian

Pengujian awal dilakukan pada rangkaian tunggal yang terdiri dari satu piezoelektrik dan satu resistor beban dengan variasi nilai resistansi. Pada pengukuran tegangan, resistor dihubungkan paralel dengan piezoelektrik dan alat ukur, sedangkan pada pengukuran arus resistor dihubungkan seri. Hasil pengujian ini dijadikan acuan untuk pengujian rangkaian seri dan paralel dengan mengukur tegangan serta arus keluaran dari setiap pukulan pada sensor.

a. Rangkaian Tunggal Piezoelektrik



(a)



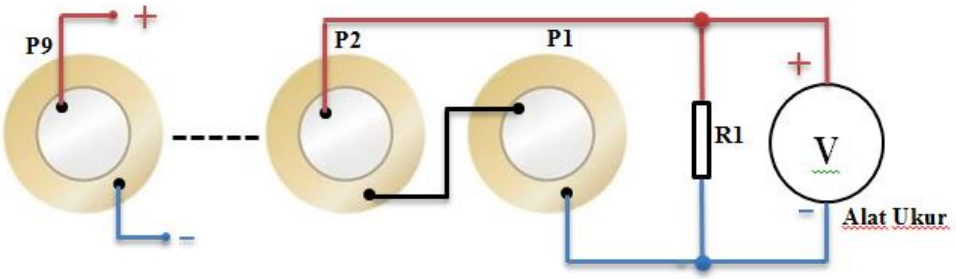
(b)

Gambar 2. (a) Pengukuran Tegangan Piezoelektrik Rangkaian Tunggal
(b) Pengukuran Arus Piezoelektrik Rangkaian Tunggal

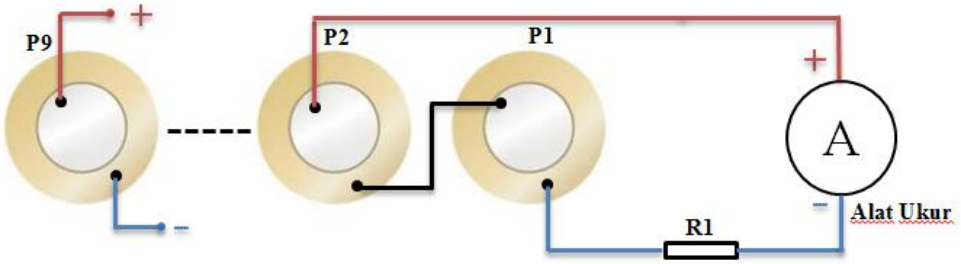
Eksperimen dilakukan dengan dua pengujian, yaitu resistor paralel untuk pengujian tegangan dan resistor seri untuk pengujian arus. Komponen utama yang digunakan meliputi multimeter, sensor piezoelektrik, resistor, alat pukul, dan karet pelindung sensor.

b. Rangkaian Seri Piezoelektrik

Pada pengujian dalam bentuk rangkaian seri, digunakan kombinasi sensor piezoelektrik sebanyak 2 hingga 9 unit (P1, P2, …, P9) dengan beban resistor tetap sebesar 100 kΩ. Resistor dihubungkan paralel dengan sensor piezoelektrik untuk pengukuran tegangan dan secara seri untuk pengukuran arus. Pengujian dilakukan dengan memberikan tekanan mekanik manual berupa sepuluh pukulan berturut-turut pada sensor.



(a)



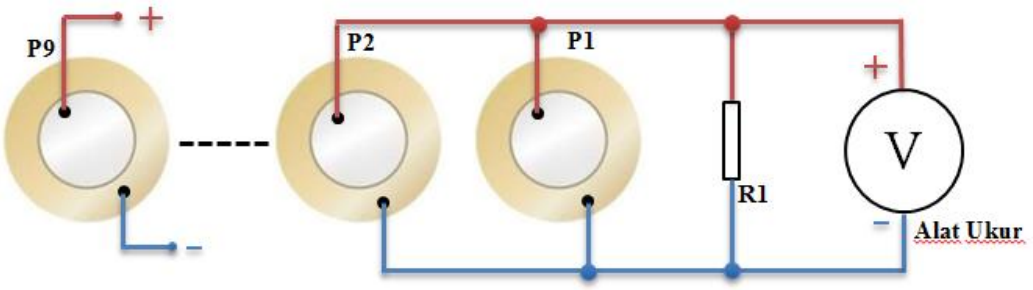
(b)

Gambar 2. (a) Pengukuran Tegangan Piezoelektrik Rangkaian Seri
(b) Pengukuran Arus Piezoelektrik Rangkaian Seri

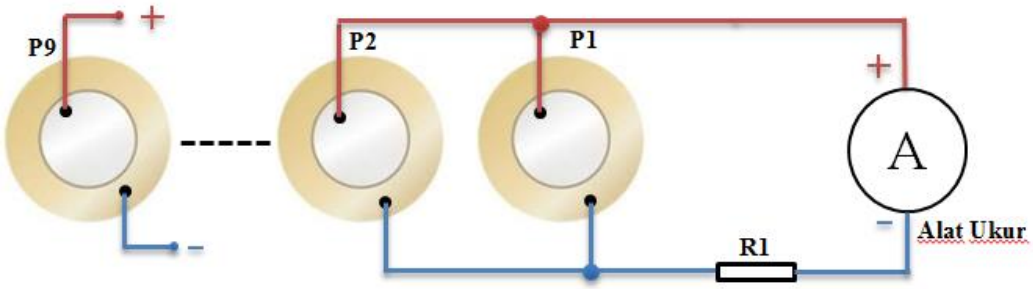
Pada rangkaian seri, sensor piezoelektrik dihubungkan dengan kutub positif (+) dari satu sensor ke kutub negatif (–) sensor berikutnya hingga membentuk jalur rangkaian tertutup. Tegangan dan arus diukur menggunakan multimeter, sementara hasilnya direkam melalui video untuk mempermudah proses pengambilan data. Hal ini diperlukan karena keluaran piezoelektrik bersifat sesaat sehingga pengambilan data akan lebih akurat.

c. Rangkaian Paralel Piezoelektrik

Seperti pada rangkaian seri, pengujian juga dilakukan pada rangkaian paralel dengan menggunakan kombinasi sensor piezoelektrik sebanyak 2 hingga 9 unit (P1, P2, …, P9) dan beban resistor tetap sebesar 100 kΩ. Pada pengukuran tegangan, resistor dihubungkan secara paralel dengan sensor piezoelektrik, sedangkan pada pengukuran arus resistor dihubungkan secara seri. Proses pengujian dilakukan dengan memberikan tekanan mekanik secara manual berupa sepuluh pukulan berturut-turut pada sensor. Rangkaian pengujian ini dirancang untuk memperoleh data tegangan dan arus keluaran yang dapat digunakan dalam membandingkan kinerja rangkaian paralel dengan rangkaian seri, sehingga diperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai efektivitas susunan sensor piezoelektrik dalam menghasilkan energi listrik.



(a)



(b)

Gambar 2. (a) Pengukuran Tegangan Piezoelektrik Rangkaian Paralel
(b) Pengukuran Arus Piezoelektrik Rangkaian Paralel

Pada penelitian ini, rangkaian paralel diuji dengan menyusun sensor piezoelektrik dalam jumlah yang bervariasi, mulai dari dua hingga sembilan unit. Dalam rangkaiani paralel, seluruh kutub positif (+) dari sensor dihubungkan menjadi satu, demikian pula seluruh kutub negatif (–) digabungkan, sehingga terbentuk sebuah rangkaian. Tegangan dan arus diukur menggunakan multimeter, sementara hasilnya direkam melalui video untuk mempermudah proses pengambilan data. Hal ini diperlukan karena keluaran piezoelektrik bersifat sesaat sehingga pengambilan data akan lebih akurat.

3.2 Hasil Pengukuran Rangkaian Piezoelektrik

a. Hasil Pengukuran Piezoelektrik Rangkaian Tunggal

Hasil pengujian pada rangkaian tunggal dengan variasi beban resistor sebesar 1 MΩ, 100 kΩ, 4,7 kΩ, 680 Ω, dan 330 Ω menunjukkan bahwa tegangan keluaran bervariasi sesuai dengan nilai beban yang digunakan. Berdasarkan data pengukuran, semakin besar nilai resistor maka tegangan dan arus yang dihasilkan cenderung lebih kecil, demikian pula sebaliknya. Fenomena ini sesuai dengan hukum Ohm, sehingga dapat memperkuat validitas hasil pengukuran. Data lengkap hasil pengujian rangkaian tunggal ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tegangan dan Arus yang dihasilkan Piezoelektrik Rangkaian Tunggal

Resistor Beban	**Output**	**Pukulan**									
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1 MΩ	Tegangan (**V**)	0,27	0,26	0,12	0,19	0,02	**0,42**	**0,02**	0,14	0,04	0,02
	Arus (**μA**)	0,3	0,2	0,23	0,2	0,03	**0,3**	**0,03**	0,22	0,06	0,1
100 kΩ	Tegangan (**V**)	**0,74**	0,12	0,47	**0,08**	0,44	0,35	0,2	0,64	0,11	0,32
	Arus (**μA**)	**7**	1,2	4,7	**0,8**	4,4	3,6	2,1	6,1	1	3,1
4,7 kΩ	Tegangan (**V**)	0,92	0,89	1	0,96	**0,87**	0,95	**1,01**	0,96	0,88	0,9
	Arus (**μA**)	194	189	211	200	**184**	202	213	**219**	186	190
680 Ω	Tegangan (**V**)	1,07	1,02	1,05	1,06	**1,12**	**1,01**	1,11	1,04	1,09	1,05
	Arus (**mA**)	1,51	1,8	1,59	**1,49**	**1,71**	1,52	1,68	1,57	1,58	1,53
330 Ω	Tegangan (**V**)	**1,14**	1,52	1,6	1,25	1,1 7	**1,69**	1,38	1,17	1,58	1,39
	Arus (**mA**)	**3,42**	4,65	4,87	3,81	3,52	**5,09**	4,22	3,61	4,74	4,33

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan berbanding lurus dengan arus, namun keduanya berbanding terbalik dengan nilai beban resistor. Semakin besar nilai beban, tegangan dan arus yang dihasilkan cenderung semakin kecil, sedangkan pada beban yang lebih rendah keduanya meningkat. Kondisi optimal diperoleh pada beban 330 Ω dengan tegangan maksimum 1,69 V dan arus 5,09 mA, sedangkan kondisi terendah terjadi pada beban 1 MΩ dengan tegangan 0,02 V dan arus 0,03 μA. Meskipun demikian, setiap pukulan masih menunjukkan fluktuasi nilai akibat ketidakseragaman tekanan yang diberikan pada sensor piezoelektrik

b. Hasil Pengukuran Piezoelektrik Rangkaian Seri

1. Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus

Hasil pengujian rangkaian seri menunjukkan bahwa jumlah sensor piezoelektrik memengaruhi tegangan dan arus keluaran. Penambahan jumlah sensor umumnya meningkatkan nilai keluaran, meskipun pada beberapa pukulan terjadi penurunan akibat perbedaan kekuatan dan konsistensi tekanan mekanis. Fluktuasi ini menunjukkan respon sensor sangat dipengaruhi oleh variasi gaya Hal ini menunjukkan perlunya pengujian dengan tekanan yang lebih terkontrol agar hasil lebih stabil. Data pengukuran tegangan dan arus ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tegangan dan Arus yang dihasilkan Piezoelektrik Rangkaian Seri

Jumlah *Piezoelektrik*	Output	Pukulan									
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
2	Tegangan (**V**)	0,37	0,45	0,35	0,32	0,44	0,32	**0,25**	**0,81**	0,47	0,72
	Arus (**µA**)	3,6	4,5	3,5	**3,2**	3,6	3,3	3,5	**8,6**	3,6	8,5
3	Tegangan (**V**)	**0,2**	**0,61**	0,34	0,54	0,34	0,26	0,34	0,21	0,26	0,29
	Arus (**µA**)	**3,2**	8,6	8,2	**8,7**	8,6	3,6	4	3,6	3,7	4,2
4	Tegangan (**V**)	**1,2**	0,53	0,31	0,523	**0,29**	0,35	0,31	0,59	0,23	0,97
	Arus (**µA**)	**15**	8	5	7	5	6,5	6,8	8,2	**4,7**	8,6
5	Tegangan (**V**)	0,63	0,57	0,74	0,58	0,927	1,11	**1,25**	**0,56**	0,71	0,75
	Arus (**µA**)	**7,6**	8,6	**9,6**	8,4	9,5	9,6	9,5	8	8,6	8,6
6	Tegangan (**V**)	0,9	0,94	0,73	0,83	1,37	1,2	**1,64**	0,91	0,96	**0,69**
	Arus (**µA**)	9,3	9,5	8,6	8,6	10,5	10,6	**13,2**	9,2	10	**8,2**
7	Tegangan (**V**)	5,2	**12,2**	8,32	4,53	3,76	8,38	6,93	6,51	**3,06**	4,96
	Arus (**µA**)	55	**120**	80,5	41,5	37,2	86,7	69,6	67,6	**32,7**	43,5
8	Tegangan (**V**)	5,51	6,07	11,6	6,78	6,74	**16,2**	7,73	8,82	**5,03**	11,32
	Arus (**µA**)	54,7	63	119,2	59,6	60,6	**167**	73	88	**51,3**	113,3
9	Tegangan (**V**)	18,74	**12**	16,44	15,07	17,10	13,77	**19,5**	13,31	12,53	18,08
	Arus (**µA**)	187,5	123,3	163,2	149,5	177	139	**191**	139,6	**123**	181,6

Hasil pengujian pada rangkaian seri menunjukkan bahwa sensor piezoelektrik mampu menghasilkan tegangan dan arus meskipun dalam skala relatif kecil. Nilai tertinggi yang diperoleh mencapai 19,5 V untuk tegangan dan 191 µA untuk arus, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 0,25 V dan 3,2 µA.

2. Hasil Analisis daya

Hasil tegangan dan arus di analisis dengan persamaan P= V×I ,maka daya dikelompokkan jadi maksimum, minimum, dan rata-rata dan disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Daya Listrik yang dihasilkan Piezoelektrik Rangkaian Seri

Jumlah Piezoelektrik	Output								
	Maksimum			Minimum			Rata-Rata		
	Tegangan (V)	Arus (µA)	Daya (µW)	Tegangan (V)	Arus (µA)	Daya (µW)	Tegangan (V)	Arus (µA)	Daya (µW)
2	0,81	8,6	6,96	0,25	3,2	0,8	0,45	4,59	2,06
3	0,619	8,7	**5,38**	0,2	3,2	**0,64**	0,34	5,64	**1,91**
4	1,21	15	18,15	0,259	4,7	1,38	0,53	7,48	3,96
5	1,25	9,6	12	0,56	7,6	4,25	0,78	8,8	6,86
6	1,64	13,2	21,64	0,69	8,2	5,65	1,017	9,77	9,93
7	12,27	120,5	1.478,58	3,06	32,7	100	6,43	63,48	408,17
8	16,27	167,2	2.720,34	5,03	51,3	258,03	8,58	84,99	729,21
9	19,59	191,6	**3.753,44**	12,02	123,2	**1.480,8**	15,26	157,55	**2.404,2**

Analisis data pengujian pada rangkaian seri menunjukkan bahwa daya tertinggi mencapai 3,753,44 µW, sedangkan daya terendah sebesar 0,64 µW. Hasil ini menunjukkan bahwa besarnya daya keluaran bergantung pada jumlah sensor piezoelektrik dalam rangkaian.

d. Hasil Pengukuran Piezoelektrik Rangkaian Paralel

1. Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus

Pengujian rangkaian seri dilakukan dengan memberikan eksitasi mekanis berupa sepuluh kali pukulan pada rangkaian yang disusun dari 2 hingga 9 sensor piezoelektrik. Pengukuran dilakukan dengan menambahkan resistor tetap sebesar 100kΩ sebagai beban dalam rangkaian. Hasil pengujian selengkapnya disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Tegangan dan Arus yang dihasilkan Piezoelektrik Rangkaian Paralel

Jumlah *Piezoelektrik*	**Output**	**Pukulan**									
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
2	Tegangan (**V**)	0,42	0,24	0,3	0,25	0,11	0,2	0,54	**0,12**	0,613	**0,7**
	Arus (**µA**)	4,3	4,4	4,5	**3,5**	4,5	4,4	4,7	3,6	6,7	**7,2**
3	Tegangan (**V**)	0,51	0,81	**1,1**	0,8	0,87	0,7	0,62	0,41	**0,32**	0,62
	Arus (**µA**)	**5,7**	9	**9,6**	8,7	8,2	7	6,5	5,6	6,4	7,7
4	Tegangan (**V**)	**1,38**	1,22	0,63	0,798	0,58	1,11	**0,53**	0,59	0,97	0,97
	Arus (**µA**)	**18**	12	6,5	8,8	**6,4**	12,2	8,6	6,5	9	8,4
5	Tegangan (**V**)	1,73	1,49	1,7	1,63	**1,86**	1,33	1,49	1,26	**1,15**	1,85
	Arus (**µA**)	17,5	14,4	16,5	16,3	**18,3**	**13**	14,6	15,5	14,2	15,3
6	Tegangan (**V**)	**2,7**	2,41	2,6	2,24	2,22	2,21	2,16	2,64	2,65	**2,1**
	Arus (**µA**)	27,5	24,2	**27**	22,7	**22**	23,3	22,5	24,5	25,5	23,4
7	Tegangan (**V**)	3,35	**2,11**	10,1	5,93	3,5	10,5	8,16	5,12	11,5	**18,9**
	Arus (**µA**)	30,8	**21,4**	103	55,5	38,7	107	80,2	50,2	116	**188**
8	Tegangan (**V**)	7,14	8,9	**2,9**	**10,2**	3,3	5,64	3,39	5,82	9,7	7,27
	Arus (**µA**)	71	89,5	**34**	**114**	38	55	39	57,5	96,7	72
9	Tegangan (**V**)	10,2	12,1	9,67	10,4	11,3	13	9,45	7,43	**13,8**	**9,23**
	Arus (**µA**)	102	120	97,5	104	113	135,3	95,3	74,5	**141**	**92,6**

Hasil pengujian rangkaian paralel menunjukkan bahwa sensor piezoelektrik menghasilkan tegangan dan arus dalam skala kecil, dengan nilai tertinggi 18,9 V dan 188 µA serta nilai terendah 0,12 V dan 3,5 µA. Meskipun hasil pengukuran menunjukkan adanya fluktuasi, fenomena lonjakan tegangan dan arus tercatat ketika jumlah sensor mencapai tujuh unit, tetapi ini hal yang wajar mengingat piezoelektrik sangat sensitif terhadap tekanan.

2. Analisis Daya Yang Dihasilkan Rangkaian Paralel

Hasil tegangan dan arus di analisis dengan persamaan P= V×I ,sehingga daya dapat dikelompokkan sesuai parameter yaitu maksimum, minimum, dan rata-rata dan disajikan pada tabel 5.

Tabel 5. Daya Listrik yang dihasilkan Piezoelektrik Rangkaian Paralel

Jumlah Piezoelektrik	Output								
	Maksimum			Minimum			Rata-Rata		
	Tegangan (V)	Arus (µA)	Daya (µW)	Tegangan (V)	Arus (µA)	Daya (µW)	Tegangan (V)	Arus (µA)	Daya (µW)
2	0,79	7,2	**5,68**	0,12	3,5	**0,42**	0,45	4,78	**2,5**
3	1,19	9,6	11,42	0,32	5,7	1,82	0,68	7,44	5,05
4	1,38	18	24,84	0,53	6,4	3,39	0,87	9,64	8,38
5	1,86	18,3	34,03	1,15	13,5	15,52	1,55	15,61	24,19
6	2,76	27,8	76,72	2,14	22	47,08	2,41	24,34	58,65
7	18,98	188,6	**3.579,6**	2,11	21,4	45,15	7,93	79,3	628,84
8	10,2	114	1.162,8	2,94	34,5	101,43	6,45	66,72	430,34
9	13,83	141	1.950,03	9,23	92,6	**854,69**	10,67	107,61	**1.148,19**

Analisis data pengujian pada rangkaian paralel menunjukkan bahwa daya tertinggi mencapai 3.579,6 µW, sedangkan daya terendah sebesar 0,42 µW. Hasil ini menunjukkan bahwa besarnya daya keluaran bergantung pada jumlah sensor piezoelektrik dalam rangkaian.

e. Hasil Daya Piezoelektrik Rangkaian Seri dan Paralel

Hasil keluaran dianalisis berdasarkan tiga parameter, yaitu maksimum, minimum, dan rata-rata, yang masing-masing mencakup nilai tertinggi, terendah, dan rata-rata guna menggambarkan variasi daya. Pemilihan parameter ini didasarkan pada karakteristik sensor piezoelektrik yang dipengaruhi oleh besar gaya mekanis. Hasil daya disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Daya Listrik Rangkaian Seri dan Paralel

No	Jenis Rangkaian	Parameter	Daya (mW)	
1	**Rangkain Seri**	Maksimum	Tertinggi	**3,75**
			Terendah	**0,0053**
			Rata-rata	**1,002**
		Minimum	Tertinggi	**1,48**
			Terendah	**0,00064**
			Rata-rata	**0,23**
		Rata-Rata	Tertinggi	**2,404**
			Terendah	**0,0019**
			Rata-rata	**0,44**
2	**Rangkaian Paralel**	Maksimum	Tertinggi	**3,57**
			Terendah	**0,0056**
			Rata-rata	**0,73**
		Minimum	Tertinggi	**0,85**
			Terendah	**0,00042**
			Rata-rata	**0,133**
		Rata-Rata	Tertinggi	**1,14**
			Terendah	**0,0025**
			Rata-rata	**0,28**

Hasil analisis menunjukkan bahwa rangkaian seri menghasilkan daya keluaran lebih tinggi dibandingkan paralel. Pada parameter maksimum, daya pada rangkaian seri mencapai 3,75 mW dengan rata-rata 1,002 mW, sedangkan paralel hanya 3,57 mW dengan rata-rata 0,73 mW. Parameter minimum juga menunjukkan keunggulan seri dengan rata-rata 0,23 mW dibandingkan paralel sebesar 0,133 mW. Secara keseluruhan, daya rata-rata total rangkaian seri mencapai 0,44 mW, lebih besar dibandingkan paralel yang hanya 0,28 mW. Meskipun demikian, rangkaian seri cenderung memiliki fluktuasi lebih tinggi, sementara konfigurasi paralel menghasilkan daya yang lebih stabil meskipun nilainya relatif lebih rendah.

KESIMPULAN

Pengujian menunjukkan bahwa rangkaian seri lebih efektif menghasilkan daya listrik dibandingkan paralel, meskipun selisihnya tidak besar. Pada rangkaian seri, daya berkisar (0,00064–3,75 mW), sedangkan rangkaian pada paralel (0,00042–3,57 mW). Hasil ini membuktikan bahwa sensor piezoelektrik mampu menghasilkan energi listrik dari eksitasi mekanis, dengan keluaran yang dipengaruhi oleh rangkaian dan jumlah sensor.

UCAPAN TERIMA KASIH (OPSIONAL)

Dalam perjalanan karya akhir ini tentunya tidak lepas dari doa, dukungan moral, semangat, serta arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang terkait dalam pembuatan tugas akhir ini.

REFERENSI

Ade, R. H. (2020). Prototipe pemanfaatan piezoelektrik pada pijakan kaki manusia sebagai sumber energi listrik alternatif.

Ashara, S. M. (2023). *Rancang Bangun Prototype Karpet Penghasil Energi Listrik Berbasis Piezoelektrik* (Doctoral dissertation, Politeknik Pelayaran Surabaya).

Diniardi, E., Syawaluddin, S., Ramadhan, A. I., Fithriyah, N. H., & Dermawan, E. (2018). Analisis Daya Piezoelektrik Model Hybrid Solar Cell-Piezoelectric Skala Rendah. *Jurnal Teknologi*, *10*(2), 139-146.

Fitriani, F., Fadillah, M. S., & Christian, J. (2023). SPEEDBUMP PIEZOELEKTRIK SEBAGAI ENERGI LISTRIK ALTERNATIF (STUDI KASUS GERBANG KAMPUS UBT). *Elektrika Borneo*, *9*(2).

Harahap, M. D., & Su'aidy, K. I. (2024). *Smart and Low Power Inverter (SMALLER)* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia).

Hasibuan, J. A., Ekaputri, C., & Sasmono, S. (2021). Perancangan Prototipe Konversi Energi Suara Menjadi Energi Listrik Dengan Bahan Piezoelektrik Memanfaatkan Energi Tekanan Tambahan Yang Berasal Dari Angin Untuk Kawasan Industri. *eProceedings of Engineering*, *8*(5).

HD, N. K., & Rifaldi, S. (2022). Analisis Potensi Energi Listrik yang Dihasilkan dari Rancang Bangun Prototipe Alat Pembangkit Listrik Menggunakan Piezoelektrik Memanfaatkan Energi Kinetik dari Keset Kaki dengan Metode Energy Harvesting. *EPSILON: Journal of Electrical Engineering and Information Technology*, *20*(1), 29-40.

Parung, J., Larissa, S., Santoso, A., & Prayogo, D. N. (2021). Penggunaan Teknologi Blokchain, Internet Of Things Dan Artifial Intelligence Untuk Mendukung Kota Cerdas. Studi Kasus: Supply Chain Industri Perikanan.

Putra, I. D. G. A. T., Septiadi, W. N., Negara, D. N. K. P., & Nindhia, T. G. T. (2024). *Atomisasi Ultrasonik Prinsip-prinsip dan Aplikasinya dalam Engineering*. MEGA PRESS NUSANTARA.

Talantan, D. Y. P. (2024). *Desain Dan Implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Getar Turbin* (Doctoral dissertation, Politeknik Negeri ujung Pandang).

Wardiyanto, W. (2021). ANALISIS PEMANFAATAN PIEZOELEKTRIK SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK ALTERNATIF BERBASIS PIJAKAN KAKI. *MOSFET*, x(x), xx-xx.

Zarkasyi, M. (2024). *Perancangan Trainer Dan Modul Internet Of Things (IOT) Pada Mata Kuliah Praktikum Sensor Dan Tranduser* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Ar-Raniry).