ANALISIS PENGARUH JUMLAH LAPISAN DENGAN TUMBUKAN KONSTAN PADA OUTPUT DAYA LISTRIK PEMANEN ENERGI *PIEZOELECTRIC* PVDF

TESIS

Diajukan untuk memenuhi persyaratan

memperoleh gelar magister

Disusun oleh:

Nama : M. Alfin Naqib Annabiil

NIM : 092024090490

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER

UNIVERSITAS GLOBAL JAKARTA

2026

HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING

Tesis ini diajukan oleh	:
Nama	: M. Alfin Naqib Annabiil
NIM	: 092024090490
Program Studi	: Magister Teknik Elektro
Judul Tesis	: Analisis Pengaruh Jumlah Lapisan Dengan Tumbukan Konstan Pada Output Daya Listrik Pemanen Energi Piezoelectric PVDF

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Global Jakarta.

DEWAN PEMBIMBING

Pembimbing 1 : Hamzah, S.T., M,T., Ph. D. ( )

Pembimbing 2 : Adhes Gamayel, S.T., M,T., Ph. D. ( )

Mengetahui,
Ketua Program Studi : Hamzah, S.T., M,T., Ph. D. ( )

Ditetapkan di : Depok
Tangal : 6 Agustus 2026

HALAMAN PENGESAHAN DEWAN PENGUJI

Tesis ini diajukan oleh	:
Nama	: M. Alfin Naqib Annabiil
NIM	: 092024090490
Program Studi	: Magister Teknik Elektro
Judul Tesis	: Analisis Output Daya Listrik Pemanen Energi *Piezoelectric* Pvdf Pada Jumlah Lapisan Dengan Tumbukan Konstan

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Global Jakarta.

DEWAN PENGUJI

Penguji 1 : Dr. Eng Yanuar Zulardiansyah Arief, S.T., M.T. ( )

Penguji 2 : Dr. Herwanto, S.Kom., M.Si. ( )

Penguji 3 : Dr. Antonius Darma Setiawan, S.Si, M.T. ( )

Ditetapkan di : Depok

Tangal : 6 Agustus 2026

Form I2 – Lembar Monitoring Revisi Sidang Skripsi	Revisi ke: 1
	Tanggal revisi: 13 Agustus 2020

LEMBAR MONITORING REVISI SKRIPSI

Nama Mahasiswa : M. ALFIN NAQIB ANNABIL

NIM : 092024090490

Prodi : S2 - Teknik Elektro

Judul Skripsi : **Analisis Output Daya Listrik Pemanen Energi Piezoelektrik Pvdf Pada Jumlah Lapisandengan Tumbukan Konstan**

Dosen Penguji III : Dr. Antonius Darma Setiawan. S.Si., M.T.

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
1	Perjelas latar belakang untuk memperkuat urgensi penelitian	Sudah ditambahkan urgensi di akhir paragraf Hal – 22	
2	Tambahkan mode matematis untuk N Lapis piezoelectric	Sudah ditambahkan model matematis dari piezoelectric seri/paralel	
3	Gunakan model tersebut membahas hasil percobaan	Sudah ditambahkan model matematis di bab IV	

Depok, 6 Agustus 2026

Mengetahui,

Ketua Program Studi

(Hamdah, S.T., M.T., Ph.D.)

NIP. S09 2023 08 0003

Form I2 – Lembar Monitoring Revisi Sidang Skripsi	Revisi ke: 1 Tanggal revisi: 13 Agustus 2020

LEMBAR MONITORING REVISI SIDANG SKRIPSI

Nama Mahasiswa : M. ALFIN NAQIB ANNABIL

NIM : 092024090490

Prodi : S2 - Teknik Elektro

Judul Skripsi : **Analisis Output Daya Listrik Pemanen Energi Piezoelektrik Pvdf Pada Jumlah Lapisandengan Tumbukan Konstan**

Dosen Penguji I : Dr. Eng Yanuar Zulardiansyah Arief, S.T., M.T.

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
1.	Dalam Abstrak, tulis kepanjangan "PVDF" dalam teks	PVDF= Polyvinylidene Fluoride Adalah Jenis Piezoelctric polimer tahan terhadap bahan kimia, panas, serta cuaca ekstrem.	yza (7-8-2026)
2.	Cek kembali konsistensi penulisan Gambar/ Tabel di Bab 2 yang di dalam teks maupun dalam penomoroan Gambar/Tabel (Contoh Hal. 37, dll)	Penulisan sudah diperbaiki pada halaman 38	yza (7-8-2026)
3.	Cek kembali penulisan referensi/singkatan dalam Bab 4 (contoh hal. 80, 82, dll)	penulisan referensi awal paragraf Nama(tahun).	yza (7-8-2026)
4.	Jelaskan secara teknis (scientifical reason), mengapa kecepatan angin tidak secara linier meningkatkan arus listrik dan tegangan dalam analisis data di Bab 4.	sudah ditambahkan penjelasan pada halaman 74 dan 96	yza (7-8-2026)
5.	Jelaskan secara teknis (scientifical reason), mengapa konfigurasi paralel lebih baik dibanding konfigurasi seri dalam analisis data di Bab 4.	penjelasan matematis sudah ditambahkan di hal 93 pembahaan	yza (7-8-2026)

Depok, 6 Agustus 2026

Mengetahui,

Ketua Program Studi

(Hamzah, S.T., M.T., Ph.D.)

NIP. 509 2023 08000 3

JGU Jakarta Global University

Form I2 – Lembar Monitoring Revisi Sidang Skripsi	Revisi ke: 1 Tanggal revisi: 13 Agustus 2020

LEMBAR MONITORING REVISI SKRIPSI

Nama Mahasiswa : M. ALFIN NAQIB ANNABIL

NIM : 092024090490

Prodi : S2 - Teknik Elektro

Judul Skripsi : **Analisis Output Daya Listrik Pemanen Energi Piezoelektrik Pvdf Pada Jumlah Lapisandengan Tumbukan Konstan**

Dosen Penguji II : Dr. Herwanto, S.Kom., M.Si.

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
1		sudah ditambahkan latar belakang	7/8-26
		judul sudah diperbaiki	7/8-26
		sudah ditambahkan pada paragraf akhir HAL 22	7/8-26
1		sudah ditambahkan pada gap + dibandingkan dengan penelitian lain	7/8-26

Depok, 6 Agustus 2026

Mengetahui,

Ketua Program Studi

(Hamzah, S.T., M.T., Ph.D.)

NIP. 509 2023 08000 3

HALAMAN PERNYATAAN
PERSETUJUAN PUBLIKASI TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai mahasiswa Jakarta Global University, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	:	M. Alfin Naqib Annabiil
NIM	:	092024090490
Program Studi	:	Magister Teknik Elektro
Fakultas	:	Teknik dan Ilmu Komputer
Jenis Karya	:	Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Jakarta Global University **Hak Bebas Royalti Non-eksklusif** (*None-exclusive Royalty Free Right*) atas kerya ilmiah saya yang berjudul:

Analisis Pengaruh Jumlah Lapisan Dengan Tumbukan Konstan Pada Output Daya Listrik Pemanen Energi Piezoelectric Pvdf

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Royalti Noneksklusif ini Jakarta Global University berhak menyimpan, mengalih-media-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di	:	Depok
Pada Tanggal	:	6 Agustus 2026



PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa berdasarkan hasil penelusuran berbagaikarya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik disuatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalamsumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UUNo. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Depok, 6 Agustus 2026
Mahasiswa,



M. Alfin Naqib Annabiil
092024090490

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan mengucap rasa syukur atas nikmat dan karunia Allah SWT selama pengerjaan hingga terselesaikannya skripsi ini, maka dengan bangga saya persembahkan Tesis ini untuk:

1. Allah SWT, karena hanya atas izin dan karunia-nya sehingga Tesis ini dapat disusun dan selesai sesuai dengan harapan.
2. Kedua Orang tua yang tidak henti-hentinya mendoakan dan memberikan semangat motivasi, serta memberikan dukungan dari segi lahir dan batin dalam menjalani perkuliahan.
3. Istri ku tercinta Udriyah yang senantiasa memberikan semangat dalam menghadapi masa perkuliahan dan anak ku tersayang Alifia Zaara Annabiil yang selalu memberikan energi kebahagiaan dan keceriaan.
4. Dosen dan karyawan di lingkungan Universitas Global Jakarta yang telah memberikan ilmu, wawasan, dan motivasi dalam proses membimbing.
5. Teman-teman seperjuangan yang senantiasa berbagi pengalaman selama menjalani perkuliahan dan pertemanan.

HALAMAN MOTTO

"Allah Swt tidak membebani seseorang melainkan dengan kesanggupannya…"

(Q.S Al-Bagarah: 286)

"Dan barang siapa bertakwa kepada Allah, niscaya Allah menjadikan baginya kemudahan dalam urusan"

(Q.S. At-Talaq: 4)

"Dan bersabarlah kamu, sesungguhnya janji Allah adalah benar"

(Q.S Ar-Rum: 60)

"Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan"

(Q.S Al-Insyirah: 5-6)

"Dan mintalah pertolongan dengan sabar dan shalat"

(Q.S Al-Baqarah: 45)

"Dan dia bersama kamu di mana saja kamu berada"

"Dan Allah Maha Melihat apa yang kamu kerjakan"

(Q.S Al-Hadid: 4)

"Barang siapa menempuh jalan untuk mencari ilmu, maka Allah akan memudahkan baginya jalan menuju ke surga"

(H.R Muslim)

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, karunia, dan inayah-Nya, sehingga dalam rangka untuk memenuhi sebagian persyaratan untuk mendapatkan gelar Magister Teknik dengan judul "Analisis Pengaruh Jumlah Lapisan Dengan Tumbukan Konstan Pada Output Daya Listrik Pemanen Energi Piezoelectric PVDF pada jumlah lapisan dengan tumbukan konstan" dapat terselesaikan sesuai dengan harapan. Tugas Tesis ini dapat terselesaikan tidak lepas dari bantuan dan kerja sama dengan pihak lain. Sehubungan dengan hal tersebut, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Djoko Setyo Widodo, S.E., M.Si., CHRA, Ph.D., selaku Rektor Universitas Global Jakarta.
2. Bapak Hamzah, S.T., M,T., Ph. D., selaku dosen Pembimbing Tesis 1 dan Kaprodi Magister Teknik Elektro Universitas Global Jakarta.
3. Ibu Sinka Wilyanti, S.T., M.T. Selaku Pembimbing Akademik Prodi Magister Teknik Elektro.
4. Bapak Adhes Gamayel, S.T., M,T., Ph. D. Selaku dosen Pembimbing Tesis 2
5. Bapak Legenda Prameswono Pratama, S.S.T., M.Sc.Eng. selaku kepala laboratorium
6. Tim penguji yang telah memberikan koreksi perbaikan, saran, dan masukan terhadap Tesis secara menyeluruh.
7. Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Elektro yang telah membantu kelancaran penelitian Tugas Tesis.

Semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu atas bantuan dan perhatiannya selama penyusunan tesis ini.

Akhirnya, semoga segala bentuk bantuan, dukungan, dan semangat yang telah diberikan semua pihak diatas menjadi amalan yang bermanfaat dan mendapatkan balasan dari Allah SWT dan Tesis ini dapat menjadi informasi yang bermanfaat bagi pembaca atau pihak lain yang membutuhkannya.

Depok, 6 Agustus 2026

Penulis,

M. Alfin Naqib Annabiil

ABSTRAK

Pemanen Energi merupakan Teknik menangkap energi terbuang dari lingkungan sekitar seperti getaran, suhu, aliran udara, dan cahaya dan mengonversinya menjadi energi listrik skala rendah untuk aplikasi seperti perangkat sensor, IoT, dan sistem otonom lainnya. Proses mengubah suatu energi menjadi bentuk energi lain diperlukan sebuah alat yang disebut dengan tranduser. Dalam pengertian yang lebih luas, tranduser juga didefinisikan sebagai sebagai suatu peralatan yang mengubah gaya atau perpindahan mekanis menjadi sinyal listrik. Pemanen energi piezoelectric (PEH) merupakan alternatif yang menjanjikan untuk pembangkitan energi terbarukan, terutama karena regangan mekanis dapat dihasilkan melalui berbagai cara, termasuk dengan memanfaatkan energi angin. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh jumlah lapisan *piezoelectric Polyvinylidene Fluoride* (PVDF) terhadap output daya listrik pada kondisi tumbukan konstan, menganalisis pengaruh variasi kecepatan motor terhadap daya listrik yang dihasilkan, serta membandingkan performa konfigurasi tunggal, dua *piezoelectric* seri, dan dua *piezoelectric* paralel. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Pengujian dilakukan menggunakan material *piezoelectric* PVDF yang dirangkai dalam tiga konfigurasi, yaitu satu *piezoelectric*, dua *piezoelectric*- seri, dan dua *piezoelectric*-paralel. Keluaran *piezoelectric* disearahkan menggunakan *Full Wave Bridge Rectifier* dan diuji pada kondisi tanpa beban serta menggunakan beban resistor 10 Ω. Data berupa tegangan, arus, dan daya listrik dianalisis secara deskriptif kuantitatif melalui perbandingan hasil pengukuran pada setiap konfigurasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi penyusunan *piezoelectric* memengaruhi daya listrik yang dihasilkan. Konfigurasi dua *piezoelectric* paralel menghasilkan daya rata-rata tertinggi dibandingkan konfigurasi satu *piezoelectric* maupun dua *piezoelectric* seri. Variasi kecepatan motor juga memengaruhi karakteristik daya keluaran meskipun peningkatannya tidak bersifat linier pada seluruh kondisi pengujian. Penelitian ini menyimpulkan bahwa konfigurasi dua *piezoelectric* paralel merupakan konfigurasi yang cukup efektif dalam meningkatkan output daya listrik pada sistem *piezoelectric energy harvester* berbasis *Polyvinylidene Fluoride* PVDF dengan total daya yang dihasilkan . 0,0715 mW.

Kata Kunci: *piezoelectric* PVDF, *piezoelectric energy harvester* (PEH), konfigurasi *piezoelectric*, *full wave bridge rectifier*, karakteristik daya.

ABSTRACT

Energy Harvesting is a technique for capturing wasted energy from the surrounding environment such as vibration, temperature, airflow, and light and converting it into low-scale electrical energy for applications such as sensor devices, IoT, and other autonomous systems. The process of converting one form of energy into another requires a device called a transducer. In a broader sense, a transducer is also defined as a device that converts force or converts a mechanism into an electrical signal. Piezoelectric energy harvesters (PEH) are a promising alternative for renewable energy generation, especially since mechanical strain can be generated through various means, including harnessing wind energy. This study aimed to analyse the effect of *Polyvinylidene Fluoride* (PVDF) *piezoelectric*. layer configuration on electrical power output under constant impact conditions, examine the influence of wind speed variation on the generated electrical power, and compare the performance of single, two-series, and two-parallel *piezoelectric* configurations. An experimental quantitative approach was employed. PVDF *piezoelectric* films were arranged into three configurations and connected to a Full Wave Bridge Rectifier. The electrical output was evaluated under open-circuit conditions and with a 10 Ω resistive load. Output voltage, current, and electrical power were measured and analysed using descriptive quantitative methods by comparing the performance of each configuration. The results showed that the *piezoelectric* configuration significantly affected the generated electrical power. The two-parallel *piezoelectric* configuration produced the highest average power output compared with the single and two-series configurations. Motor speed variation also influenced the electrical power output, although the increase was not entirely linear under all testing conditions. It can be concluded that the two-parallel configuration is the most effective arrangement for improving the electrical power output of a Polyvinylidene Fluoride (PVDF) *piezoelectric* energy harvesting system with total output 0,0715mW.

Keywords: PVDF piezoelectric, piezoelectric energy harvesting (PEH), piezoelectric configuration, Full Wave Bridge Rectifier, Power Characteristics.

DAFTAR ISTILAH

No.	Istilah	Keterangan
1	AC (Alternating Current)	Arus listrik bolak-balik yang arah dan besarnya berubah secara periodik terhadap waktu.
2	Arus Listrik (I)	Laju aliran muatan listrik melalui suatu penghantar atau rangkaian listrik, dinyatakan dalam ampere (A).
3	Baling-baling	Komponen mekanik pada kincir angin yang berfungsi menangkap energi angin dan mengubahnya menjadi gerak rotasi.
4	*Bending Mode*	Mode deformasi piezoelectric yang bekerja melalui pembengkokan atau pelenturan material akibat gaya mekanik.
5	Beban Listrik (Load)	Komponen atau rangkaian yang menerima dan menggunakan energi listrik yang dihasilkan oleh pemanen energi.
6	*Cantilever Beam*	Struktur balok yang salah satu ujungnya terpasang tetap dan ujung lainnya bebas sehingga dapat mengalami deformasi lentur akibat gaya eksternal.
7	*Close Circuit*	Kondisi rangkaian listrik dalam keadaan tertutup sehingga arus dapat mengalir melalui beban.
8	Deformasi Mekanik	Perubahan bentuk atau dimensi suatu material akibat pemberian gaya atau tegangan mekanik.
9	Dielectric Constant (ε_r)	Besaran yang menyatakan kemampuan relatif suatu material dielektrik dalam menyimpan energi listrik melalui polarisasi.
10	Direct *Piezoelectric* Effect	Efek piezoelectric ketika deformasi atau tegangan mekanik pada material menghasilkan muatan atau beda potensial listrik.
11	DC (Direct Current)	Arus listrik searah yang memiliki arah aliran tetap.
12	Eksitasi Mekanik	Gaya, getaran, tumbukan, atau gerakan mekanik yang diberikan kepada elemen piezoelectric sehingga menghasilkan deformasi.
13	Efek *Piezoelectric*	Fenomena konversi energi antara energi mekanik dan energi listrik pada material piezoelectric.
14	Efek *Piezoelectric* Langsung	Konversi energi mekanik menjadi energi listrik akibat tekanan, regangan, getaran, atau deformasi pada material piezoelectric.
15	Efek *Piezoelectric* Terbalik	Perubahan bentuk atau deformasi mekanik pada material piezoelectric akibat pemberian medan listrik.
16	Energi Angin	Energi kinetik yang terdapat pada aliran udara dan dapat dikonversikan menjadi energi mekanik melalui kincir atau turbin angin.
17	Energi Listrik	Energi yang berkaitan dengan keberadaan dan pergerakan muatan listrik serta dapat digunakan untuk melakukan kerja pada suatu beban.

18	Energy Harvesting	Proses menangkap energi dari lingkungan dan mengonversinya menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan oleh perangkat berdaya rendah.
19	Full-Wave Bridge Rectifier	Rangkaian penyearah gelombang penuh yang mengubah tegangan atau arus AC menjadi keluaran DC dengan memanfaatkan kedua setengah siklus sinyal AC.
20	Gaya Mekanik (F)	Interaksi mekanik berupa dorongan atau tarikan yang bekerja pada material dan dapat menyebabkan deformasi.
21	g_{31} (Konstanta Tegangan Piezoelectric)	Konstanta yang menyatakan hubungan antara medan listrik yang dihasilkan pada arah poling dengan tegangan mekanik yang diberikan pada arah tertentu.
22	Impedansi (Z)	Besaran yang menyatakan hambatan total suatu rangkaian terhadap aliran arus listrik, khususnya pada sistem yang memiliki karakteristik kapasitif atau frekuensi tertentu.
23	IoT (Internet of Things)	Konsep sistem yang menghubungkan perangkat fisik dengan jaringan komunikasi untuk melakukan pengukuran, pertukaran data, dan pengendalian.
24	Kapasitansi (C)	Kemampuan suatu komponen atau material untuk menyimpan muatan listrik, dinyatakan dalam farad (F).
25	Kincir Angin	Perangkat yang memanfaatkan energi kinetik angin untuk menghasilkan gerak rotasi yang digunakan sebagai sumber eksitasi mekanik dalam penelitian.
26	Konfigurasi Paralel	Susunan dua atau lebih elemen piezoelectric yang dihubungkan secara paralel sehingga terminal-terminal dengan polaritas yang sama terhubung bersama.
27	Konfigurasi Seri	Susunan dua atau lebih elemen piezoelectric yang dihubungkan secara berurutan sehingga keluaran listrik dari masing-masing elemen tersusun dalam satu jalur arus.
28	Konstanta Dielektrik	Parameter yang menunjukkan sifat permitivitas relatif suatu material terhadap permitivitas vakum.
29	Konstanta *Piezoelectric* (d)	Parameter material yang menggambarkan hubungan antara besaran mekanik dan listrik pada material piezoelectric.
30	Konstanta Tegangan *Piezoelectri*c (g)	Parameter piezoelectric yang menghubungkan medan listrik yang dihasilkan dengan tegangan mekanik yang diberikan pada material.
31	Layer (Lapisan)	Susunan lembaran atau elemen PVDF yang ditempatkan secara bertingkat untuk membentuk konfigurasi piezoelectric multilayer.
32	*Load Resistance* (RL)	Nilai resistansi beban yang terhubung pada keluaran pemanen energi untuk mengukur karakteristik tegangan, arus, dan daya.

33	*Multilayer*	Konfigurasi yang terdiri atas beberapa lapisan atau elemen piezoelectric yang disusun secara bertingkat dan dapat dihubungkan secara seri atau paralel.
34	*Open Circuit* (Rangkaian Terbuka)	Kondisi pengukuran ketika rangkaian keluaran tidak terhubung dengan beban sehingga arus yang mengalir secara ideal mendekati nol.
35	Output Daya Listrik	Besarnya daya listrik yang dihasilkan oleh sistem pemanen energi dan tersedia pada terminal keluaran untuk disalurkan ke beban.
36	Pemanen Energi (Energy Harvester)	Perangkat yang menangkap energi dari sumber lingkungan dan mengonversinya menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan.
37	Pemanen Energi Piezoelectric (Piezoelectric Energy Harvester/PEH)	Sistem pemanen energi yang menggunakan material piezoelectric untuk mengonversi energi mekanik menjadi energi listrik.
38	Permitivitas (ε)	Parameter material yang menyatakan kemampuan suatu medium dalam merespons medan listrik dan menyimpan energi elektrostatik.
39	Piezoelectric	Material atau fenomena yang memungkinkan terjadinya konversi energi mekanik menjadi energi listrik dan sebaliknya.
40	Poling (Poling Direction)	Proses dan arah orientasi dipol listrik pada material piezoelectric yang menentukan arah respons elektromekanik material.
41	Polyvinylidene Fluoride (PVDF)	Polimer piezoelectric yang memiliki sifat fleksibel, ringan, dan mampu menghasilkan respons listrik akibat deformasi mekanik.
42	Power Output (P)	Daya listrik yang dihasilkan pada terminal keluaran sistem, umumnya dinyatakan dalam watt (W) atau miliwatt (mW).
43	PVDF Film	Film tipis berbahan Polyvinylidene Fluoride yang digunakan sebagai elemen piezoelectric dalam penelitian.
44	Regangan (Strain, S)	Perubahan relatif dimensi suatu material akibat pembebanan mekanik.
45	Rangkaian Pengkondisian Daya	Rangkaian elektronik yang berfungsi mengolah, menyearahkan, atau menyesuaikan keluaran listrik dari pemanen energi agar sesuai dengan kebutuhan beban.
46	Resistansi (R)	Besaran yang menyatakan hambatan suatu komponen terhadap aliran arus listrik, dinyatakan dalam ohm (Ω).
47	Resistor	Komponen elektronik yang memiliki nilai resistansi tertentu dan digunakan sebagai beban atau pembatas arus dalam rangkaian.
48	Seri	Metode penyusunan beberapa elemen listrik secara berurutan dalam satu jalur rangkaian.

49	Sumbu Poling	Arah referensi pada material piezoelectric yang menunjukkan orientasi polarisasi listrik material.
50	Tegangan Listrik (V)	Beda potensial listrik antara dua titik yang menjadi indikator kemampuan sumber listrik untuk menghasilkan aliran arus melalui beban.
51	Tegangan Mekanik (Stress, T)	Gaya mekanik yang bekerja per satuan luas penampang material, dinyatakan dalam pascal (Pa).
52	Tegangan Rangkaian Terbuka (V_oc)	Tegangan yang diukur pada terminal keluaran ketika tidak terdapat beban yang terhubung atau arus keluaran secara ideal bernilai nol.
53	Transduser	Perangkat yang mengubah suatu bentuk energi atau besaran fisik menjadi bentuk energi atau sinyal lain yang dapat diukur.
54	Tumbukan Konstan	Kondisi pengujian ketika mekanisme tumbukan antara baling-baling kincir angin dan elemen PVDF dipertahankan pada kondisi mekanik yang ditetapkan selama pengujian.
55	Variasi Kecepatan Motor	Perubahan kecepatan putar motor yang digunakan untuk menghasilkan variasi eksitasi atau frekuensi tumbukan pada sistem piezoelectric.
56	Variabel Beban	Kondisi resistansi yang diberikan pada keluaran sistem untuk mengevaluasi respons listrik pemanen energi.
57	Variabel Kecepatan Putar	Parameter berupa jumlah putaran motor atau kincir per satuan waktu yang umumnya dinyatakan dalam revolutions per minute (RPM).
58	Voltase	Istilah umum yang digunakan untuk menyatakan besarnya tegangan listrik antara dua titik pada rangkaian.

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING.....**Error! Bookmark not defined.**
HALAMAN PENGESAHAN DEWAN PENGUJI.....**Error! Bookmark not defined.**
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....**Error! Bookmark not defined.**
PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS.....**Error! Bookmark not defined.**
HALAMAN PERSEMBAHAN..... vi
HALAMAN MOTTO vii
KATA PENGANTAR..... viii
ABSTRAK x
DAFTAR ISTILAH..... vii
DAFTAR ISI.....xvi
DAFTAR GAMBAR..... xviii
DAFTAR TABEL xx
BAB I PENDAHULUAN..... 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah..... 4
1.3 Batasan Masalah..... 4
1.4 Tujuan Penelitian..... 4
1.5 Manfaat Penelitian..... 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Landasan Teori 5
2.1.1 *Piezoelectric*.....5
2.1.2 Pengertian Baling-baling.....10
2.1.3 Jenis pemasangan *Piezoelectric* sebagai pemanen energi.....10
2.1.4 Pengondisian daya Listrik.....13
2.2 Penelitian Terdahulu 14
2.3 Kerangka Pikir Penelitian.....23
2.4 Hipotesis Penelitian 24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....26
3.1. Jenis Penelitian 26
3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian 27
3.3. Populasi dan Sampel / Subjek Penelitian.....28

3.4. Bahan dan Peralatan....28
3.6. Perancangan alat....34
3.7. Reliabilitas....40
3.8. Teknik Pengumpulan Data....41
3.9. Teknik Analisis Data....41
3.10. Rencana Luaran Penelitian....41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN....43
4.1 Gambaran Umum Objek Penelitian....43
4.2 Implementasi Prototype Penelitian....48
4.3 Pelaksanaan Pengujian....49
4.4 Hasil Pengujian dan Pembahasan....55
4.5 Pembahasan Hipotesis Penelitian....71
4.6 Implikasi Hasil Penelitian....81
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN....84
5.1 Kesimpulan....84
5.2 Keterbatasan Penelitian....85
5.3 Saran....86
DAFTAR PUSTAKA....88

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Visualisasi Efek *Piezoelectric* 13
Gambar 2.2 Visualisasi arah poling *Piezoelectric*.....15
Gambar 2.3. Sudut Lengkung dan Besaran Output Volt 16
Gambar 2.4. Poros Baling-baling Kincir Angin 16
Gambar 2.5. Pemasangan Kantilever.....17
Gambar 2.6. Pemasangan Mode Tekan.....17
Gambar 2.7. Pemasangan Mode Geser 18
Gambar 2.8. Pemasangan terintegrasi dengan Struktur.....19
Gambar 2.9 Konversi tegangan AC ke DC 20
Gambar 2.10. Tegangan keluaran *piezoelectric* pada berbagai kecepatan angina.....22
Gambar 2.11. Diagram Alir Penelitian.....27
Gambar 3.1. Flowchart Metode Penelitian.....39
Gambar 3.2. *Piezoelectric* PVDF Film 41
Gambar 3.3 Kincir Angin Poros Vertikal 42
Gambar 3.4. Motor Listrik 12V DC 43
Gambar 3.5. Holder dan dudukan.....43
Gambar 3.6 Papan Circuit Board 44
Gambar 3.7 Multimeteter.....44
Gambar 3.8 Osiloskop.....45
Gambar 3.9 Variabel Power Supplay.....45
Gambar 3.10 Komponen Pembebanan 46
Gambar 3.11 Gambar 3.11. Diagram Blok Pengambilan data Penelitian.....47
Gambar 3.12 Pemasangan Kincir angin dan *Piezoelectric* pada holder 48
Gambar 3.13. Layer pada *Piezoelectric* PVDF Film 49
Gambar 3.14. Rangkaian penyearah gelombang penuh 49
Gambar 3.15 Rangkaian Pengukuran Open Circuit.....50
Gambar 3.16 Rangkaian Pengukuran Close Circuit beban 10 Ohm 51
Gambar 3.17 Rangkaian Pengukuran Close Circuit beban LED 52

Gambar 4.1 Prototype keseluruhan alat 57
Gambar 4.2 Tampak samping alat 58
Gambar 4.3 Holder dan PVDF 58
Gambar 4.4 Detail layer PVDF 59
Gambar 4.5 Prototype setelah proses implementasi dan siap dilakukan pengujian. 61
Gambar 4.6 Proses Pengujian Konfigurasi 1 Lapisan PVDF 63
Gambar 4.7 Pembacaan Hasil Pengukuran Konfigurasi 1 Lapisan.....64
Gambar 4.8 Proses Pengujian Konfigurasi 2 Lapisan PVDF 65
Gambar 4.9 Pembacaan Hasil Pengukuran Konfigurasi 2 Lapisan rangkaian Parale 66
Gambar 4.10 Pembacaan Hasil Pengukuran Konfigurasi 2 Lapisan rangkaian Seri.....67
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Tegangan Tanpa Beban (Open Circuit).....69
Gambar 4.12 Grafik Tegangan *Piezoelectric* dengan beban 10 Ohm.....71
Gambar 4.13 Grafik Arus *Piezoelectric* Menggunakan Beban Resistor 10 Ohm. 71
Gambar 4.14 Grafik Daya Listrik *piezoelectric* Beban Resistor 10 Ohm.....73
Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Tegangan *Piezoelectric* 75
Gambar 4.16 Grafik Perbandingan Arus *Piezoelectric* 76
Gambar 4.17 Grafik Perbandingan Daya beban 10 Ohm 78
Gambar 4.18 Grafik Hubungan Kecepatan Motor terhadap Daya Keluaran 83
Gambar 4.19 Perbandingan Rata-rata Daya Keluaran Setiap Konfigurasi 86

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Sumber energi mekanik disekitar kita yang dapat dipanen menjadi energi listrik 6

Tabel 2.1. Spesifikasi *Piezoelectric* PVDF Film 13

Tabel 2.2. Perbandingan Material *Piezoelectric* 14

Tabel 2.3. Penelitian Terdahulu 21

Tabel 3.1 Spesifikasi *Piezoelectric* PVDF Film 31

Tabel 3.2 Indikator Performans 34

Tabel 3.3 Tabel Pengumpulan Data Penelitian 38

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Tegangan *Piezoelectric* Tanpa Beban 68

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Tegangan *Piezoelectric* Menggunakan Beban Resistor 10 Ω.....70

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Daya *Piezoelectric* Menggunakan Beban Resistor 10 Ω.....73

Tabel 4.4 Perbandingan Tegangan Keluaran Seluruh Konfigurasi tanpa beban. 74

Tabel 4.5 Perbandingan Arus Keluaran Seluruh Konfigurasi 76

Tabel 4.6 Perbandingan Daya Keluaran Seluruh Konfigurasi 77

Tabel 4.7 Persentase Perbandingan Daya Keluaran pada Beban 10 Ω.....81

Tabel 4.8 Perubahan Daya Keluaran terhadap Variasi Kecepatan Motor 83

Tabel 4.9 Daya Keluaran Setiap Konfigurasi 85

Tabel 4.10 Perbandingan Daya terhadap Konfigurasi Tunggal.....85

DAFTAR LAMPIRAN

1. Biodata Penulis
2. Surat Permohoan pemakaian ruang penelitian
3. Form Pemakaian Laboratorium
4. Lembar revisi
5. Foto prototype
6. Data Peneitian

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi terbarukan menjadi solusi strategis karena mampu memanfaatkan sumber energi yang tersedia di lingkungan, seperti radiasi matahari, angin, panas bumi, biomassa, dan lain sebagainya, yang secara teoritis tidak habis dan memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil (Solikah & Bramastia, 2024). Salah satu pendekatan yang berkembang dalam memanfaatkan sumber energi ini adalah teknologi pemanenan energi (*energy harvesting*), yaitu sistem yang menangkap energi terbuang dari lingkungan sekitar seperti getaran, suhu, aliran udara, dan cahaya dan mengonversinya menjadi energi listrik skala rendah untuk aplikasi seperti perangkat sensor, IoT, dan sistem otonom lainnya (Ullah, Q dkk). Teknologi pemanenan energi, terutama yang berbasis *piezoelectric* dan vibro‑mekanik, telah dipelajari secara luas dalam literatur terbaru karena potensinya untuk menghasilkan listrik dari sumber energi kinetik yang berlimpah namun terbuang di berbagai sistem mesin dan struktur (Yang dkk., 2025).

Proses mengubah suatu energi menjadi bentuk energi lain diperlukan sebuah alat yang disebut dengan tranduser. Dalam pengertian yang lebih luas, tranduser juga didefinisikan sebagai sebagai suatu peralatan yang mengubah gaya atau perpindahan mekanis menjadi sinyal listrik (Diniardi, E., dkk. 2018). Dalam bidang teknik elektro, teknologi pemanenan energi mekanik banyak dikembangkan dengan memanfaatkan transduser. Transduser berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui berbagai mekanisme, seperti elektromagnetik, elektrostatik, triboelektrik, dan *piezoelectric*. Dari berbagai metode tersebut, *piezoelectric* menjadi salah satu teknologi yang paling banyak diteliti karena memiliki struktur sederhana, ukuran kecil, dan kemampuan konversi energi yang baik pada skala mikro. (Adhes Gamayel & Ade Sunardi, 2024). *Piezoelectric* merupakan fenomena fisika di mana material tertentu mampu menghasilkan muatan listrik ketika mengalami tekanan atau deformasi mekanik, yang dikenal sebagai efek *piezoelectric* langsung, serta mengalami deformasi mekanik ketika dikenai medan listrik, yang disebut sebagai efek *piezoelectric* terbalik. Fenomena ini pertama kali ditemukan oleh Pierre Curie dan

Jacques Curie pada tahun 1880 melalui pengamatan terhadap kristal kuarsa dan beberapa material kristalin lainnya (Uchino, 2017). Penemuan tersebut menjadi dasar pengembangan berbagai perangkat elektronik seperti sensor, aktuator, dan transduser yang hingga kini masih digunakan secara luas dalam bidang industri dan teknologi medis. Dalam beberapa dekade terakhir, teknologi *piezoelectric* mengalami perkembangan signifikan seiring meningkatnya kebutuhan akan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu aplikasi yang banyak dikembangkan adalah pemanenan energi (energy harvesting), yaitu pemanfaatan energi mekanik dari lingkungan seperti getaran, tekanan, dan gerakan untuk diubah menjadi energi listrik skala kecil (Shaukat et al., 2023). Pendekatan ini dinilai potensial untuk mendukung sistem berdaya rendah (low-power systems) dan perangkat mandiri tanpa ketergantungan pada baterai konvensional. Kemajuan dalam pengembangan material *piezoelectric*, baik berupa keramik seperti lead zirconate titanate (PZT) maupun polimer fleksibel seperti polyvinylidene fluoride (PVDF), turut memperluas penerapan teknologi ini. Material PVDF, misalnya, memiliki keunggulan berupa fleksibilitas mekanik, bobot ringan, dan ketahanan terhadap lingkungan, sehingga cocok diaplikasikan pada struktur dinamis dan wearable devices (Shaukat et al., 2023). Selain itu, integrasi *piezoelectric* pada sistem otomotif, lantai interaktif, serta infrastruktur pintar menunjukkan potensi besar dalam pemanfaatan energi mekanik yang sebelumnya terbuang (Kiswantono, 2024).

Penelitian-penelitian terkini juga menunjukkan bahwa sistem *piezoelectric* dapat dirancang dengan berbagai konfigurasi mekanik dan rangkaian pengkondisian daya untuk meningkatkan efisiensi keluaran listrik yang dihasilkan (Budiman et al., 2025). Oleh karena itu, kajian mendalam mengenai desain, karakteristik, dan implementasi sistem *piezoelectric* sebagai pemanen energi menjadi penting untuk mendukung pengembangan teknologi energi terbarukan skala kecil yang aplikatif dan berkelanjutan, seperti pada penelitian pemanfaatan *piezoelectric* pada sebuah Sistem Suspensi kendaraan (Muhammad Fathul Hikmawan. 2024), *piezoelectric* menghasilkan efek *piezoelectric* dengan cara penekanan pada permukaan sehingga menghasilkan tegangan listrik, akan tetapi pada suspensi kendaraan jumlah *piezoelectric* pemasangannya sangat terbatas, sehingga tegangan keluaran juga terbatas, penggunaan jenis *piezoelectric* keramik beresiko dengan ketahanan yang mudah pecah setelah beberapa kali terkena tekanan. Pemanfaatan *piezoelectric* pada

speedbumb dijalan raya (Pathoni, H. 2021). Pada penggunaan *piezoelectric* pada speedbumb dijalan raya secara tekanan pada speedbam area tekanan hanya berfokus pada roda sehingga area tekanan sangat sempit dan keluaran daya listrik relatif kecil dan tidak berlangsung secara terus menerus, karena hanya mengandalkan tekanan dari ban kendaraan yang lewat., penggunaan jenis *piezoelectric* keramik pada penelitian ini juga menambah kekurangan dari ketahanan nya saat terus menerus ditekan dengan beban berat akan cepat pecah/ rusak. Pengujian Jenis *piezoelectric* dengan variasi perbandingan luas tumbukan dengan kincir angin micro (Adhes G, 2024). Percobaan penggunan *piezoelectric* dengan memanfaatkan kincir angin untuk membuat efek tumbukan, sehingga menghasilkan efek *piezoelectric* yang menghasilkan output tegangan listrik.

Berdasarkan kajian penelitian sebelumnya, terdapat beberapa research gap yang masih perlu dikembangkan, yaitu:

1. Sebagian besar penelitian masih menggunakan material *piezoelectric* keramik yang memiliki keterbatasan fleksibilitas dan ketahanan mekanik.
2. Penggunaan struktur single-layer menyebabkan daya keluaran yang dihasilkan masih relatif rendah.
3. Penelitian mengenai pengaruh jumlah lapisan PVDF terhadap peningkatan performa keluaran listrik masih terbatas.
4. Analisis perbandingan konfigurasi rangkaian seri dan paralel pada *piezoelectric* PVDF multilayer belum banyak dilakukan.
5. Pemanfaatan tumbukan kincir angin sebagai sumber eksitasi mekanik pada sistem PVDF multilayer masih jarang dikembangkan.

Berdasarkan research gap tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem *piezoelectric energy harvesting* (PEH) menggunakan material PVDF multilayer dengan konfigurasi rangkaian seri dan paralel yang diintegrasikan pada mekanisme tumbukan kincir angin. Penggunaan PVDF multilayer diharapkan mampu meningkatkan tegangan dan daya keluaran yang dihasilkan dibandingkan struktur single-layer.

Selain itu, penggunaan energi angin sebagai sumber eksitasi mekanik dipilih karena bersifat melimpah, ramah lingkungan, dan berkelanjutan sehingga berpotensi menjadi sumber energi alternatif untuk sistem elektronik berdaya rendah. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi

piezoelectric energy harvesting berbasis material fleksibel, sekaligus menjadi referensi pengembangan sistem pemanen energi listrik skala kecil yang lebih efektif, aplikatif, dan berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

1. Apakah penerapan konfigurasi lapisan *piezoelectric* berpengaruh pada output tegangan dan arus listrik dari *piezoelectric*?
2. Apakah penerapan variasi kecepatan motor (tumbukan konstan) berpengaruh terhadap performa keluaran *piezoelectric* PVDF?
3. Konfigurasi manakah yang menghasilkan performa keluaran daya listrik paling besar pada pemanen energi *piezoelectric* PVDF dengan tumbukan konstan?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini hanya membahas output daya listrik yang dihasilkan pada *piezoelectric* jenis PVDF yang dirangkai seri parallel dan berlapis, diaplikasikan pada prototipe kincir angin. Penelitian difokuskan pada pengukuran tegangan, arus listrik dan daya listrik yang dihasilkan, tanpa membahas implementasi pada skala industri.

1.4 Tujuan Penelitian

Agar penelitian lebih terarah dan memiliki ruang lingkup yang jelas, maka penelitian ini dibatasi pada beberapa aspek berikut:

1. Mengetahui output tegangan dan arus listrik *piezoelectric* pada setiap konfigurasi lapisan *piezoelectric*.
2. Mengetahui perbedaan penerapan variasi kecepatan konstan pada konfigurasi lapisan terhadap hasil output *piezoelectric*
3. Mengetahui konfigurasi yang meningkatan daya listrik paling besar pada pemanen energi *piezoelectric* PVDF dengan tumbukan konstan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat berupa pemahaman mengenai implementasi *piezoelectric* PVDF pada sistem pemanen energi angin, serta menjadi referensi pengembangan teknologi pemanen energi listrik skala rendah berbasis *piezoelectric* pada masa mendatang. Kemudian mengetahui karakteristik *piezoelectric* film PVDF saat di aplikasikan pada kincir angin sehingga dapat bermanfaat bagi Pemanen Energi Listrik skala rendah.

DAFTAR PUSTAKA

Adhes Gamayel, Ade Sunardi. *Performance of piezoelectric energy harvester with various ratio substrate and micro windmill*, 2024. TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control Vol. 22, No. 2, April 2024, pp. 480~487 doi: 10.12928/telkomnika.v22i2.25691.

Gamayel, A. (2024). *Recent Developments of Piezoelectric Energy Harvester for Scavenging Vibration Energy*. Journal of Global Engineering Research and Science, 3(2), 50–55. https://doi.org/10.56904/j-gers.v3i2.110

Adhes G, 2025 *Performance of piezoelectric energy harvesters at various angles*, 2025. TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control Vol. 23, No. 6, December 2025, pp. 1666~1675 doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v23i6.26860.

Akshayveera, Federico C. Buroni, Roderick Melnika, Luis Rodriguez-Temblequec, Andres Saez. 2025. *Environment-friendly technologies with lead-free piezoelectric materials: A review of recent developments, applications, and modelling approaches*. Wilfrid Laurier University, Waterloo, Ontario N2L3C5, Canada.

Al Ghazi, A., Ouslimani, A., & Kasbari, A.-E. (2025). *Advances in interface circuits for self-powered piezoelectric energy harvesting systems: A comprehensive review. Sensors*, 25(13), 4029.

Amine Ben Alaya, Charfeddine Mrad, Férid Kourda. *Piezoelectric* energy harvesting under free and forced vibrations for different operating conditions[J]. AIMS Energy, 2024, 12(6): 1334-1365. doi: 10.3934/energy.2024060

A. Safari dan E. K. Akdoğan. *Piezoelectric dan Acoustic Materials for Transducer Applications*. New York, NY, USA: Springer, 2022.

Bhadwal, N., Ben Mrad, R., & Behdinan, K. (2023). *Review of Piezoelectric Properties and Power Output of PVDF and Copolymer-Based Piezoelectric Nanogenerators. Nanomaterials*, 13(24), 3170. https://doi.org/10.3390/nano13243170

BJ Ultrasonic, "*Piezoelectric*ity Basics," 2024.

Brusa, E., Carrera, A., & Delprete, C. (2023). A Review of *Piezoelectric* Energy Harvesting: Materials, Design, and Readout Circuits. Actuators, 12(12), 457. https://doi.org/10.3390/act12120457

Maritza Budiman, A., et al. (2025). Pemanfaatan energi dengan teknologi *piezoelectric* pada sepatu untuk daya ponsel dengan langkah kaki manusia. SUTET, 15(1).

Creswell, J. W. (2021). Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. Sage Publications.

Dimas Ramadhan Putra1, Jhav Sund Oktoricoento, 2018.Energi Alternatif Melalui Getaran Beban Mekanis Vol. 3, Institut Pertanian Bogor.

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

Ebrahimi, Farzad. 2013. Piezoelectric Materials and Devices-Practice And Aplications. Croatia: Rijeka.

F. H. Syed, L. W. Thong, M. F. Baig, Y. K. Chan, and M. N. E. Efzan, "A Comparative Study of Material and Structural Configurations in *Piezoelectric* Energy Harvesting", Emerg Sci J, vol. 9, no. 1, pp. 346–361, Feb. 2025.

Hikmawan, M.F., Azhari, B., Yazid, E., Nugraha, A.S., Mirdanies, M., 2024. A Novel Design and Performance Analysis of *Piezoelectric* Energy Harvester with Application to a Vehicle Suspension System Moving on Uniform Bridges. International Journal of Technology. Volume 15(4), pp. 1133-1147

H. Liang, G. Hao, and O. Z. Olszewski, "A review on vibration-based *piezoelectric* energy harvesting from the aspect of compliant mechanisms," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 331, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.sna.2021.112743.

International Renewable Energy Agency. (2024). Renewable capacity statistics 2024 — global renewable energy expansion data.

Jiang Yang, Xingsheng Luo, Shixin Liu, Yirou Feng, Anna A. Guliakova, and Guodong Zhu, ACS Applied Materials & Interfaces 2024 16 (29), 38334-38344

Kiswantono, A. (2024). Inovasi energi hijau: *Piezoelectric* untuk mengubah getaran kendaraan menjadi listrik. Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan, 12(3).

K. J. Kim, "*Piezoelectric* Polymer Sensors and Actuators," Smart Materials and Structures, vol. 32, no. 1, 2023.

Lv, F., Hong, Z., Ahmad, Z., Li, H., Wu, Y., et al. (2023). Design of Flexible *Piezoelectric* Nanocomposite for Energy Harvesters: A Review. Energy Material Advances, 4, 0043. https://doi.org/10.34133/energymatadv.0043

M. Ikbal, M. Rizal, A. Nurdin, dan T. E. Putra, "Design and experimental study of *piezoelectric* energy harvester integrated in rotating vehicle tire using end-cap

system," Results in Engineering, vol. 25, p. 104195, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104195.

Measurement Specialties, "PVDF Piezo Film Technical Manual," Datasheet, 2024.

Ö. Özan Dkk., "A Review of *Piezoelectric* Phenomena as a Key Characteristic of Wood," Journal of Renewable Materials, vol. 12, no. 12, pp. 1985–2016, 2024.

Mohammadpourfazeli, S., Ansari, A., Yang, S., Mallick, K., & Bagherzadeh, R. (2023). Future prospects and recent developments of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) *piezoelectric* polymer: Fabrication methods, structure, and electro-mechanical properties. RSC Advances, 13, 370–387. https://doi.org/10.1039/D2RA06774A

Pratama, L., Herdiyansyah, R., & Manfaluthy, M. (2022). Rancang Bangun Prototipe Pemanen Energi Getaran pada Speed Bump Menggunakan Tranducer *Piezoelectric*. Medika Teknika : Jurnal Teknik Elektromedik Indonesia, 3(2), 39-48. doi:https://doi.org/10.18196/mt.v3i2.14126

reswell, J. W. (2014). Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches (4th ed.)

Rifki Abi Setiawan, Syaiful Alam. 2020. Rancang Bangun Sistem Pemanen Energi di Lantai Menggunakan Modul BQ25570 pada Aplikasi *Piezoelectric Energy Harvesting*. Universitas Lampung.

S. D. Mahapatra, P. C. Mohapatra, A. I. Aria, G. Christie, Y. K. Mishra, S. Hofmann, V. K. Thakur, *Piezoelectric* Materials for Energy Harvesting and Sensing Applications: Roadmap for Future Smart Materials. *Adv. Sci.* 2021, 8, 2100864. https://doi.org/10.1002/advs.202100864

Sharma. 2006. *Studies on Structural Dielectric and Piezoelectric Properties of Doped PCT Ceramics*. Deemed University. Punjab.

Shaukat, H., Ali, A., Bibi, S., Altabey, W. A., Noori, M., & Kouritem, S. A. (2023). A review of the recent advances in *piezoelectric* materials, energy harvester structures, and their applications in analytical chemistry. Applied Sciences, 13(3), 1300.

Solikah, A. A., & Bramastia, B. (2024). Systematic literature review: Kajian potensi dan pemanfaatan sumber daya energi baru dan terbarukan di Indonesia. Jurnal Energi Baru dan Terbarukan, 5(1).

Sugiyono. (2007).Metode Penelitian Bisnis. Bandung: Alfabeta.

Sugiyono. (2014). Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Bandung: Alfabeta.

Sugiyono**.** (2017).Pendekatan kuantitatif, kualitatif, kombinasi, dan R&D.CV. Alfabeta: Bandung 225 (87).

T. W. Brown, T. Bischof-Niemz, K. Blok, C. Breyer, H. Lund, B. V. Mathiesen, 2018. *Renewable Sustainable Energy Rev.* , **92**, 834.

Talib, N. H. H. A., Salleh, H., Youn, B. D., & Resali, M. S. M. (2019). Comprehensive Review on Effective Strategies and Key Factors for High Performance *Piezoelectric* Energy Harvester at Low Frequency. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 16(4), 7181-7210. https://doi.org/10.15282/ijame.16.4.2019.03.0537

Uchino, K. (2017). The development of *piezoelectric* materials and the new perspective. In Advanced *Piezoelectric* Materials: Science and Technology (2nd ed.).

Ullah, Q., Rauta, T., Keskikuru, J., Haverinen, J., & Ruuskanen, P. (2025). Innovations in energy harvesting: A survey of low‐power technologies and their potential. Energy Reports, 14, 671–692. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.06.019

Wati, E.K. (2021) 'Rekayasa Vibrasi Kendali dan Pemanfaatan Vibrasi dengan *Piezoelectric* di bidang Rekayasa Instrumentasi & Kontrol'.

Yang, S., Xia, H., Chen, Z., Xia, Y., & Wang, X. (2025). Self‐powered multi‐input hybrid energy harvesting generator for combined energy sources. Nano Energy, 132, 110417.