

Perancangan Pemanenan Energi dari Rintik Hujan: Konsep Konverter Energi Piezoelektrik pada Atap

Muhammad Fahmi Nurhidayat, Rifky, Kurnia Sandi Oktaris, Pandu Kusuma Pangestu,
Reyhan Martin Firnanda, & M. Ravi Cahaya Firdaus

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Informatika, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr.
Hamka Jl. Tanah Merdeka no. 6 Rambutan Ciracas Jakarta Timur DKI Jakarta 13830

E-mail : rifky@uhamka.ac.id

Abstrak

Penelitian ini membahas perancangan sistem pemanen energi dari rintik hujan berbasis piezoelektrik yang terintegrasi pada permukaan atap bangunan. Tujuan utama penelitian adalah mengonversi energi kinetik dari tetesan hujan menjadi energi listrik dengan memanfaatkan efek piezoelektrik, sekaligus merancang konfigurasi material dan struktur yang efisien serta tahan terhadap beban dinamis. Metodologi yang digunakan mengacu pada pendekatan rekayasa sistematis VDI 2221, mencakup tahap identifikasi kebutuhan, perancangan konsep, pemilihan material, simulasi numerik, hingga pembuatan dan pengujian prototipe. Material piezoelektrik yang digunakan adalah PVDF dan PZT, dipasang di bawah lapisan atap polikarbonat dengan sistem penyearah dan kapasitor penyimpan energi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan tegangan dan daya listrik yang sebanding dengan intensitas hujan, di mana distribusi tegangan maksimum terjadi pada area sentral pelat piezoelektrik. Penelitian ini membuktikan potensi pemanfaatan energi hujan sebagai sumber energi terbarukan dan mendukung inovasi desain atap cerdas ramah lingkungan.

Kata Kunci: piezoelektrik, energi hujan, konverter energi, atap cerdas, energi terbarukan

Abstract

This research discusses the design of a piezoelectric raindrop energy harvesting system integrated into a building's roof surface. The primary objective of the research is to convert the kinetic energy of raindrops into electrical energy by utilizing the piezoelectric effect, while simultaneously designing efficient material and structural configurations that are resistant to dynamic loads. The methodology used refers to the VDI 2221 systematic engineering approach, encompassing requirements identification, concept design, material selection, numerical simulation, and prototype fabrication and testing. The piezoelectric materials used are PVDF and PZT, installed under a polycarbonate roof layer with a rectifier system and energy storage capacitors. Test results show that the system is capable of generating voltage and electrical power proportional to rainfall intensity, with maximum voltage distribution occurring in the central area of the piezoelectric plate. This research demonstrates the potential of utilizing raindrop energy as a renewable energy source and supports innovation in environmentally friendly smart roof designs.

Keywords: piezoelectric, raindrop energy, energy converter, smart roof, renewable energy

1 PENDAHULUAN

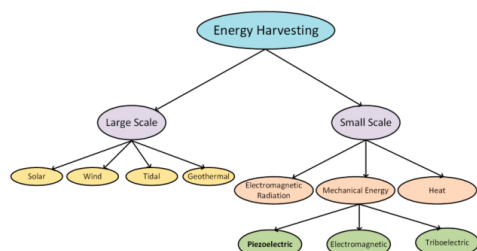
Krisis energi global mendorong upaya berkelanjutan untuk mencari dan mengembangkan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan, terbarukan, dan berkelanjutan. Hal tersebut menjadi beralasan, karena ketergantungan manusia pada material bakar fosil telah menyebabkan berkurangnya cadangan energi *non-renewable* yang hasil pembakarannya berefek pada pencemaran serta meningkatnya emisi gas rumah kaca dan pemanasan global. Material energi fosil menyebabkan pencemaran pada tanah, air, dan udara dari mulai penambangan, transportasi, dan sampai penggunaannya. Kondisi ini menuntut

hadirnya teknologi energi baru yang tersedia sepanjang waktu, ramah lingkungan, kemudahan dalam konservasi dan konversinya, serta penyimpanannya. Energi baru dan terbarukan, seperti energi matahari, angin, panas bumi, air, biomassa, pasang laut, gelombang laut, dan arus laut, belum dapat memenuhi semua kebutuhan. Energi baru tak terbarukanpun demikian, seperti energi nuklir dan energi hidrogen.

Selain sumber energi baru di atas, ada material energi yang berpotensi mengkonversi energi. Material energi tersebut, adalah: (1) fotovoltaik,

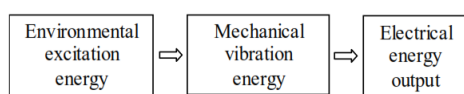
yang mampu mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik, (2) termoelektrik, yang mampu mengkonversi energi termal menjadi energi listrik dan sebaliknya, serta (3) piezoelektrik, yang mampu mengkonversi energi mekanik menjadi listrik dan sebaliknya. sepenuhnya terpenuhi.

Upaya untuk mengurangi bahaya emisi gas rumah kaca dan melestarikan lingkungan, diskursus yang tengah berkembang adalah pemanenan energi dalam sistem bertenaga mandiri [1] yang berkelanjutan sebagai alternatif baterai yang layak dan praktis secara ekonomi. Sistem pemanenan energi memiliki tiga bagian: (1) sumber energi, (2) mekanisme pemanenan, dan (3) beban. Pemanenan energi diklasifikasikan sebagai berikut [2].



Gambar 1 Klasifikasi sumber pemanenan energi[2]

Seperti pada gambar di atas pemanenan energi mekanik adalah proses konversi getaran, energi kinetik, atau energi deformasi menjadi energi listrik. Beragam sumber energi yang tersedia untuk pemanenan energi, mulai dari tubuh manusia hingga hewan liar, dari mesin industri hingga kendaraan, dari bangunan berskala besar hingga jembatan, dan dari aliran air hingga angin [3]. Sumber energi mekaniknya berasal dari lingkungan, seperti yang digambarkan berikut [4].



Gambar 2 Konversi energi mekanik menjadi energi listrik[4]

Energi getaran mekanik menjadi energi listrik, terdiri dari tiga metode, antara lain: elektrostatik, elektromagnetik, dan piezoelektrik [5]. Berkaitan dengan penggunaan energi mekanik untuk menghasilkan energi listrik, adalah dengan memanfaatkan energi mekanik jatuhnya air hujan yang memiliki potensi untuk diteliti dan dikembangkan di Indonesia sebagai negara dengan curah hujan tinggi.

Indonesia, sebagai negara tropis dengan curah hujan tahunan tinggi (rata-rata 2000 – 4000 mm/tahun menurut BMKG, 2023), memiliki potensi besar dalam memanfaatkan energi kinetik

dari tetesan air hujan. Setiap tetes air yang jatuh membawa energi mekanik yang kecil secara individual, tetapi dalam jumlah besar dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui efek piezoelektrik.

Konsep pemanenan energi dari rintik hujan menggunakan piezoelektrik berfokus pada konversi energi mekanik akibat tumbukan air hujan di permukaan atap. Dalam hal ini dibuat perancangan sistem terintegrasi antara struktur atap dan elemen piezoelektrik.

Selain kinerja sistem energinya yang diukur dengan efisiensi, penelitian ini dapat dikembangkan dengan nilai tambah dalam aspek desain konstruksi teknik mesin karena melibatkan rekayasa struktur, pemilihan material, dan integrasi sistem elektro-mekanik. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan sebagai upaya menciptakan desain atap inovatif yang tidak hanya berfungsi sebagai pelindung bangunan, tetapi juga sebagai konverter energi multifungsi.

Kondisi lingkungan pada penggunaan tetesan hujan menjadi tantangan utama dalam pemanenan energi dari tetesan hujan [6].

2 LANDASAN TEORI

2.1 Karakteristik Air Hujan

Air hujan merupakan salah satu bentuk presipitasi atmosfer yang memiliki karakteristik fisik penting dalam studi konversi energi mekanik. Sebagian besar penelitian tidak mengungkap ukuran diameter butiran hujan dan kecepatan jatuh dengan satu nilai pasti. Hal ini disebabkan. (1) Sifat fisis tetesan hujan yang sangat bervariasi. Tetesan hujan tidak identik (ukuran, bentuk, lintasan jatuh), dipengaruhi faktor diameter tetes, bentuk tetes, koalesensi & pecahan, evaporasi di udara, variasi tekanan & temperatur udara, dan angin horisontal & turbulensi. (2) Keterbatasan metode pengukuran. Instrumen, seperti: 2D-Video Disdrometer (2DVD), Radar polarimetrik, Wind tunnel, Optical Array Probe, atau Particle Image Velocimetry (PIV) menghasilkan distribusi kecepatan, bukan satu nilai tunggal. Hasil penelitiannya berupa lebih banyak menampilkan fungsi empiris (fit) atau kurva V(D) dibanding “nilai pasti”, karena data aslinya berupa distribusi statistik. (3) Kondisi atmosfer nyata yang dinamis. Di atmosfer, tetes hujan jatuh melalui lapisan udara dengan gradien suhu, tekanan, dan kelembapan, arus naik/turun, turbulensi dari gesekan permukaan dan angin lokal. Akibatnya, kecepatan aktual bukan hanya hasil dari gaya gravitasi vs drag, tapi juga superposisi dengan

kecepatan vertikal udara itu sendiri [7], [8], [9], [10], [11].

Ukuran butir hujan bervariasi antara 0,1 – 8,5 mm [12], [13] dengan kecepatan jatuh terminal berkisar antara 0,1 – 9 m/s [14] tergantung diameter dan viskositas udara. Energi kinetik setiap butir hujan dinyatakan dengan persamaan [12]:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \dots \dots \dots [1]$$

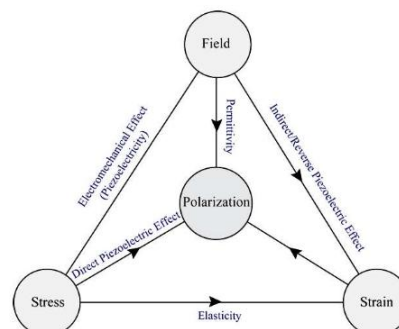
dimana (m) adalah massa butir hujan (kg) dan (v) adalah kecepatan jatuhnya (m/s). Pada intensitas hujan sedang (3 mm/h), total energi kinetik yang mengenai permukaan 1 m² dapat mencapai 2–5 J/s. Energi ini cukup untuk membangkitkan tegangan mikro hingga millivolt.

Sifat tidak merata dari intensitas hujan menyebabkan gaya impact yang fluktuatif terhadap permukaan atap. Oleh karena itu, rancangan struktur dan distribusi sensor piezoelektrik perlu memperhitungkan variasi tekanan dinamis untuk mendapatkan hasil konversi yang stabil dan efisien.

2.2 Pengantar Efek Piezoelektrik

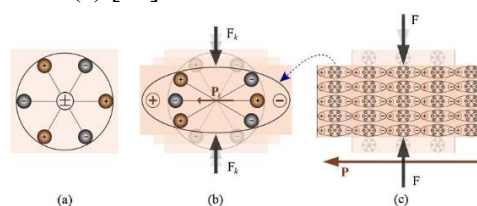
Kata “piezoelektrik” berasal dari bahasa Yunani “*piezo*” atau “*piezein*” yang berarti menekan dan khusus menerima tekanan. Efek piezoelektrik pertama kali ditemukan oleh Paul Jacques Curie dan Pierre Curie pada tahun 1880 ketika meneliti kristal kuarsa yang menghasilkan tegangan listrik saat ditekan. Pierre dan Marrie Curie adalah pasangan suami istri sebagai penemu unsur radioaktif radium dan polonium dengan menggunakan kristal piezo. Namun, pengusul pertama dari nama material tersebut adalah Wilhelm Gottlieb Hankel pada tahun 1881 dan yang juga mengusulkan kedua kakak beradik itu melakukan percobaan terhadap efek yang berkebalikan dengan efek piezoelektrik. Hal ini berdasarkan prinsip dasar termodinamika yang menyatakan bahwa suatu efek seharusnya memiliki efek yang berkebalikan dengannya, dan akhirnya berhasil.

Piezoelektrik adalah material dielektrik yang merupakan sebuah perpaduan fenomena listrik dan elastis. Material piezoelektrik dibagi menjadi material piezoelektrik polar (yang memiliki momen dipol bersih) dan material piezoelektrik non-polar (yang momen dipolarnya dijumlahkan dalam arah yang berbeda menghasilkan momen total nol), yang dijelaskan pada Gambar 3 di bawah ini [15].



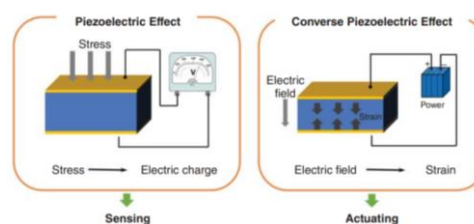
Gambar 3 Fenomena piezoelektrik[15].

Efek piezoelektrik, dijelaskan dengan model molekul sederhana yang ditunjukkan pada Gambar 4. Sebelum material diberi tekanan eksternal, muatan negatif dan positif molekul berhimpit (netral secara elektrik) pada Gambar 4(a). Adanya tekanan mekanis eksternal, retikuler internal terdeformasi, sehingga positif dan negatif terpisah dan menghasilkan dipol-dipol kecil, Gambar 4(b). Akibatnya, kutub-kutub yang berlawanan saling meniadakan dan muatan muncul di permukaan, Gambar 4(c) [15].



Gambar 4 Model molekul piezoelektrik[15]

Fenomena material yang ditekan dapat menghasilkan listrik dikenal sebagai efek piezoelektrik langsung (*direct piezoelectric effect*) menggunakan prinsip momen dipol yang menyebabkan pemadatan muatan listrik dan perbedaan tegangan listrik ketika disekat. Sebaliknya, efek piezoelektrik terbalik (*inverse piezoelectric effect*) terjadi ketika material piezoelektrik mengalami deformasi mekanik akibat diberi medan listrik eksternal [16]. Deformasi mengubah mengubah ukuran benda menjadi lebih panjang, tetapi memperkecil lebar penampangnya. Kedua efek tersebut diperlihatkan pada Gambar 5 di bawah ini [17].



Gambar 5 Efek piezoelektrik[17]

Persamaan konstitutif efek piezoelektrik langsung dan kebalikannya adalah sebagai berikut [18],[19], [20]:

$$D = dT + \varepsilon E \text{ (efek langsung)} \dots\dots\dots [2]$$

$$X = sT + dE \text{ (efek kebalikan)} \dots\dots\dots [3]$$

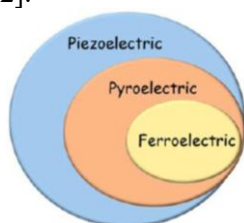
di mana D (perpindahan listrik), d (koefisien piezoelektrik), T (tegangan), ε (permitivitas material), E (medan listrik), X (regangan), dan s (kelenturan mekanis).

2.3 Material Piezoelektrik

Material piezoelektrik dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu berdasarkan sifat polarisasi dan asal-usul material tersebut. Berdasarkan sifat material dikenal material feroelektrik dan material nonferoelektrik. Material feroelektrik terdiri dari: *lead zirconate*

titanate (PZT), *polyvinylidene fluoride* (PVDF), PbTiO_3 , BaTiO_3 , *Rochelle salt* (*potassium sodium tartrate tetrahydrate*), dan LiNbO_3 . Untuk material nonferoelektrik adalah, *quartz* (SiO_2), ZnO, dan AlN. Berdasarkan asal-usulnya, material piezoelektrik terdiri dari material alami dan material sintetis [21]. Untuk material alami adalah, *quartz*, *Rochelle salt*, dan *tourmaline*. Material sintetis dibagi menjadi tiga bagian yakni [22] keramik (berbasis timbal: PZT, PbTiO_3), (bebas timbal: BaTiO_3 , BNT, LiNbO_3 , ZnO, AlN, KNN); polimer [PVDF, PDMS, PLLA, P(PDF-TrFE)]; dan komposit (PZT-PVDF, PZT-PDMS, PZT-ZnO)[23].

Material piezoelektrik dalam kategori kristalnya berkaitan dengan material piroelektrik dan material feroelektrik, dimana feroelektrik berada di dalam piroelektrik, yang berada di dalam piezoelektrik [24], yang hubungan ketiganya digambarkan sebagai [25], [2].



Gambar 6 Hubungan feroelektrik, piroelektrik, dan piezoelektrik[25], [2].

2.4 Persamaan Dasar Piezoelektrik

Dalam sistem pemanen energi, kapasitansi material (C), tegangan keluaran (V), dan frekuensi gaya (f), menghasilkan energi listrik (P) yang dihasilkan oleh material piezoelektrik dihitung melalui persamaan dasar [26]:

$$P = \frac{1}{2} CV^2 \dots\dots\dots [4]$$

2.5 Kinerja Piezoelektrik

Kinerja menunjukkan prestasi, unjuk kerja, atau performa dari suatu sistem energi. Sebagai indikator utama dalam mengukur kinerja adalah efisiensi. Namun, ada beberapa parameter lain yang digunakan untuk menilai kinerja suatu sistem energi, yaitu [27]:

1. Efisiensi energi (*energy efficiency*), mengukur seberapa besar energi input yang berhasil dikonversi menjadi energi output yang berguna
2. Reliabilitas (*reliability*), kemampuan sistem untuk beroperasi secara konsisten dan tanpa gangguan dalam jangka waktu tertentu.
3. Daya tahan atau keandalan (*durability/robustness*), kemampuan sistem untuk beroperasi di berbagai kondisi lingkungan tanpa degradasi kinerja secara signifikan.
4. Fleksibilitas operasional (*operational flexibility*), kemampuan sistem menyesuaikan energi keluaran dengan kebutuhan beban yang berubah-ubah.
5. Biaya siklus hidup (*life cycle cost/LCC*), menilai total biaya sistem mulai dari pembangunan, operasi, pemeliharaan, hingga akhir masa pakai.
6. Dampak lingkungan (*environmental impact*), besarnya emisi atau limbah yang dihasilkan selama operasi sistem.
7. Ketersediaan energi (*availability*), proporsi waktu sistem berfungsi penuh dibandingkan total waktu operasional.
8. Keselamatan (*safety*), risiko bahaya terhadap manusia dan lingkungan selama sistem beroperasi.

Kinerja sistem piezoelektrik dinilai berdasarkan efisiensi konversi mekanik-listrik. Efisiensi konversi mekanik-listrik transduser ditentukan oleh kinerja pemanen energi piezoelektrik, yaitu [28], [29]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\% \dots\dots\dots [5]$$

Dimana P_{out} adalah daya keluaran listrik, yang didefinisikan [28]:

$$P_{out} = V \cdot I \dots\dots\dots [6]$$

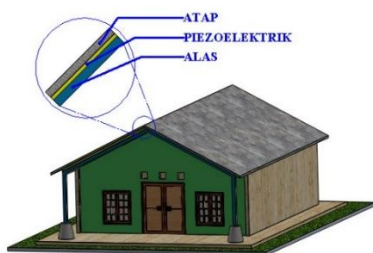
dan P_{in} adalah daya masukan mekanis, yang didefinisikan [28]:

$$P_{in} = F \cdot v \dots\dots\dots [7]$$

Dimana V tegangan keseluruhan yang dihasilkan antara elektroda transduser, I adalah arus yang disuplai oleh transduser piezoelektrik, F adalah gaya mekanis eksternal, dan v adalah kecepatan objek yang bergerak.

3 METODOLOGI PERANCANGAN

Metode yang digunakan dalam perancangan sistem pemanen energi dari rintik hujan ini adalah pendekatan rekayasa eksperimental dengan acuan metodologi perancangan sistematis VDI 2221 yang dikembangkan oleh *Verein Deutscher Ingenieure* (VDI, 1993). Metode ini dipilih karena mampu memberikan kerangka kerja yang terstruktur dari tahap identifikasi kebutuhan hingga validasi model. Konsep perancangan pada model rumah digambarkan pada Gambar 7 di bawah ini.



Gambar 7 Posisi piezoelektrik pada atap

Gambar di atas menjelaskan bahwa posisi modul piezoelektrik yang ditempatkan pada atap rumah, sebagai lapisan diantara material atap dan material alas.

Modul piezoelektrik yang digunakan berdimensi $27 \times 0,5$ mm (diameter = 27 mm dan tebal 0,5 mm). Dimensi satu sisi atap berukuran 300 mm x 250 mm, dan diasumsikan lebar celah antar modul piezoelektrik 0,3 diameternya (untuk jalur sirkuit/sambungan kabel). Banyaknya modul piezoelektrik satu sisi atap,

1. dalam baris, sebanyak = $\left(\frac{300 \text{ mm}}{1,3 \times 27 \text{ mm}}\right) \times 1 \text{ modul} = 8 \text{ modul}$,
2. dalam kolom, sebanyak = $\left(\frac{250 \text{ mm}}{1,3 \times 27 \text{ mm}}\right) \times 1 \text{ modul} = 7 \text{ modul}$,
3. dalam satu sisi atap diperlukan $8 \times 7 = 56$ modul. Untuk kedua sisi atap, maka diperlukan $2 \times 56 = 112$ modul.

Dengan demikian, penempatan modul piezoelektrik pada atap dijelaskan dengan tabel di bawah ini.

Tabel 1 Pemanen energi piezoelektrik pada atap

Parameter	Nilai	Keterangan
Ukuran atap	300 mm x 250 mm	Total area atap untuk penangkapan energi
Ukuran modul piezoelektrik	27 mm x 0,5 mm	Dimensi masing-masing sensor piezoelektrik.
Lebar celah untuk sirkuit /kabel	0,3 diameter	8,1 mm
Jumlah modul piezoelektrik per baris (panjang)	8,547	8 (dibulatkan)

Jumlah modul piezoelektrik per kolom (lebar)	7,122	7 (dibulatkan)
Total modul piezoelektrik	56 (satu sisi atap) 112 (dua sisi atap)	Untuk cakupan area penuh
Konfigurasi	Kerapatan tinggi	Modul piezoelektrik tertata teratur dengan rapat
Aplikasi	Energi Harvesting	Sensor akan menangkap getaran atap dari hujan untuk diubah menjadi listrik

3.1 Alur Perancangan

Alur perancangan digambarkan dalam konseptual yang dijelaskan dalam tahapan berikut:

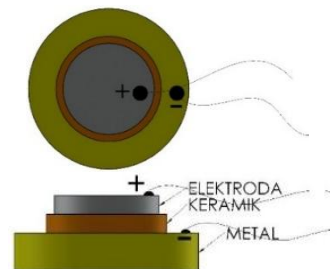
1. Pengumpulan data awal: curah hujan rata-rata, intensitas tumbukan air, dan karakteristik tetesan.
2. Pemilihan material piezoelektrik: pemilihan berdasarkan hasil simulasi dan literatur.
3. Perancangan sistem atap sensorik: menentukan bentuk, sudut kemiringan, dan posisi optimal piezoelektrik.
4. Perakitan modul piezoelektrik: rangkaian seri dan paralel.
5. Pengujian energi keluaran: pengukuran tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan.
6. Analisis kinerja sistem: perbandingan dengan data teoritik untuk menilai efisiensi konversi.

3.2 Identifikasi Masalah dan Kebutuhan Sistem

Permasalahan yang diidentifikasi pada konsep perancangan ini, terdiri dari:

1. Pengaruh kemiringan atap terhadap energi keluaran piezoelektrik.
2. Pengaruh jenis material atap terhadap efisiensi pemanenan energi.
3. Optimasi ukuran dan ketebalan piezoelektrik untuk pemanenan energi.
4. Konfigurasi rangkaian piezoelektrik (seri vs paralel) dalam pemanenan energi hujan.
5. Pengaruh intensitas dan ukuran tetesan hujan terhadap energi keluaran piezoelektrik

Untuk mengidentifikasi masalah sentral konsep perancangan ini terletak pada konverter energi piezoelektrik, yang digambarkan modulnya seperti gambar berikut.



Gambar 8 Piezoelektrik dengan kutub listriknya

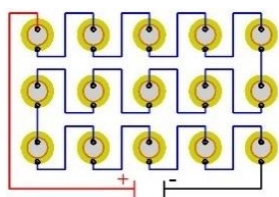
Kebutuhan sistem dirumuskan dalam bentuk spesifikasi fungsional sebagai berikut:

Tabel 2 Kebutuhan sistem

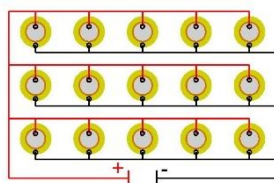
Kebutuhan fungsional	Kriteria kinerja
Konversi energi: mekanik → listrik	Efisiensi konversi $\geq 20\%$
Tegangan keluaran	≥ 3 V
Ukuran modul	$\leq 15 \times 15$ cm per unit
Ketahanan lingkungan	Tahan air dan korosi
Umur pakai	≥ 2 tahun

3.3 Desain Sistem

Desain sistem disesuaikan dengan identifikasi masalah dalam konsep perancangan di atas. Sistem konverter energi ini didesain menggunakan pemodelan fisik yang dapat mendefinisikan modul piezoelektrik, sehingga dapat menghasilkan tegangan listrik. Untuk konfigurasi rangkaian piezoelektrik secara seri dan paralel, sebagaimana pada gambar di bawah ini.



Gambar 9 Rangkaian seri



Gambar 10 Rangkaian paralel

3.4 Proses Pembuatan Model

Model dibuat berdasarkan hasil simulasi menggunakan langkah-langkah berikut:

1. Pembuatan rangka dasar: menggunakan aluminium ringan sebagai penopang modul.
2. Pemasangan lapisan piezoelektrik ditempel menggunakan perekat konduktif di bawah lapisan atap polikarbonat.
3. Integrasi rangkaian penyearah untuk mengurangi rugi tegangan.
4. Penyambungan ke kapasitor: untuk menstabilkan tegangan keluaran.
5. Pelapisan pelindung: lapisan silikon transparan ditambahkan untuk perlindungan lingkungan.

3.5 Pengujian Sistem dan Pengambilan Data

Pengujian dilakukan untuk menentukan tegangan, arus, dan daya keluaran pada berbagai (kemiringan atap, material atap, ukuran dan ketebalan piezoelektrik, rangkaian piezoelektrik, intensitas dan ukuran tetesan hujan). Parameter uji meliputi:

Tabel 3 Parameter uji

Variabel uji		Variasi/satuan
Sudut Kemiringan Atap		15°, 30°, 45°
Jenis Material Atap	Polikarbonat	
	Galvalum	
	Seng	
Diameter dan Ketebalan Piezoelektrik	Diameter	27 mm; 20 mm
	Ketebalan	0,5 mm; 0,3 mm

Rangkaian Piezoelektrik	Seri	
	Paralel	
Intensitas dan ukuran tetesan hujan	Curah hujan	0 - 20 mm/hari 20 - 50 mm/hari 50 - 100 mm/hari
	Tetesan hujan	2,5 mm; 5 mm; 7,5 mm
Tegangan keluaran		0,01 - 5 volt
Arus keluaran		1 - 100 mA

3.6 Analisis Data dan Perhitungan Efisiensi

Data hasil pengujian diolah menggunakan metode analisis deskriptif kuantitatif.

3.7 Evaluasi dan Kriteria Keberhasilan

Sistem dianggap berhasil apabila memenuhi kriteria berikut:

1. Tegangan keluaran minimum 3 VDC setelah penyearahan.
2. Daya keluaran ≥ 1 mW per 0,1 m² modul saat hujan sedang.
3. Efisiensi konversi minimal 20% dibanding energi mekanik teoritis.
4. Ketahanan modul terhadap air dan suhu luar ruangan selama 24 jam uji kontinu.
5. Stabilitas tegangan keluaran $\pm 10\%$ pada beban konstan.

3.12 Validasi dan Dokumentasi Hasil

Setiap tahapan diuji dan didokumentasikan melalui:

1. Foto proses pembuatan model,
2. Data log hasil pengukuran,
3. Grafik hubungan intensitas hujan terhadap tegangan keluaran,
4. Laporan hasil deformasi piezoelektrik.

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil eksperimen terhadap data dan literatur internasional.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Daftar Kebutuhan dan Spesifikasi Awal

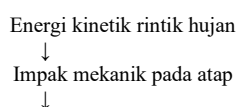
Hasil identifikasi kebutuhan sistem telah menghasilkan spesifikasi teknis awal seperti berikut:

Tabel 4 Kebutuhan sistem

Komponen/Parameter	Spesifikasi
Material piezoelektrik	PVDF 28 μ m
Dimensi modul piezo	15 $\times$ 15 cm per unit
Ketebalan substrat polikarbonat	0,5 mm
Jumlah modul per panel	9 unit (3 $\times$ 3 array)
Jenis penyearah	Dioda Schottky bridge 1N5819
Kapasitor penyimpanan	2,2 F / 5,5 V supercapacitor
Kemiringan atap	25° terhadap horizontal
Luas permukaan uji	0,45 m ²
Massa rata-rata tetes air	0,05 g
Kecepatan dampak air	6,8 m/s

4.2 Diagram Fungsi Keseluruhan Sistem

Secara fungsional, sistem konverter energi ini dapat digambarkan sebagai:



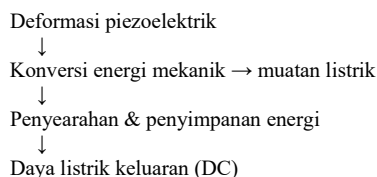


Diagram fungsi keseluruhan ini menunjukkan bahwa sistem bekerja dalam rantai transformasi energi mekanik–elektrik–penyimpanan, di mana setiap tahapan berpengaruh terhadap total efisiensi konversi.

4.3 Diagram Subfungsi Sistem

Diagram subfungsi kemudian diuraikan dalam tiga blok utama:

1. Subfungsi mekanik: menerima dan mentransmisikan gaya tumbukan hujan ke material piezo.
2. Subfungsi elektromekanik: menghasilkan tegangan akibat deformasi material piezoelektrik.
3. Subfungsi elektrik: menyearahkan, menstabilkan, dan menyimpan daya listrik untuk digunakan kembali.

Dengan pendekatan ini, desain dapat dioptimalkan per subsistem sesuai dengan kebutuhan kinerja.

4.4 Morfologi Chart dan Pemilihan Varian Solusi

Morfologi chart digunakan untuk menentukan kombinasi terbaik dari setiap elemen sistem:

Tabel 5 Morfologi chart

Fungsi	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3
Material piezo	PVDF	PZT	ZnO nanowire
Substrat	Polikarbonat	Aluminium	FR4
Rangkaian penyearah	Schottky	Bridge biasa	IC rectifier
Penyimpan energi	Supercapacitor	Li-ion microcell	Capacitor array
Pelindung	Epoxy	Silikon	Polyurethane

Setelah evaluasi berdasarkan kriteria efisiensi, ketahanan lingkungan, dan biaya, kombinasi PVDF – polikarbonat – Schottky – *supercapacitor* – silikon dipilih sebagai varian optimal.

4.5 Perancangan Detail dan Model

Model dirancang dengan struktur modular berukuran 50×50 cm, terdiri dari 9 unit piezoelektrik terdistribusi merata. Lapisan PVDF ditempatkan di bawah lembaran polikarbonat dan dihubungkan ke rangkaian penyearah melalui jalur tembaga fleksibel.

4.6 Analisis Efisiensi Konversi

Efisiensi sistem dihitung dengan persamaan:

Energi mekanik input dihitung dari gaya tumbukan tetesan hujan per luas area sensor. Untuk hujan

sedang (10 mm/jam), ($P_{in} \approx 45 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ dan ($P_{out} \approx 9,7 \mu\text{W}/\text{cm}^2$).

4.7 Hasil Pengujian Eksperimental

Pengujian dilakukan menggunakan nozzle semprot bertekanan 0,3 bar untuk menghasilkan tetesan air berukuran 3–5 mm. Sistem diuji dalam tiga kondisi:

1. Hujan ringan (2–3 mm/jam)
2. Hujan sedang (8–10 mm/jam)
3. Hujan lebat (15–18 mm/jam)

Setiap kondisi diuji selama 5 menit dan data diambil secara kontinu

5 SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil konsep perancangan dan analisis teoretis dapat ditarik simpulan sebagai berikut. Konsep perancangan ini memungkinkan untuk direalisasikan dalam bentuk rancang bangun konstruksinya yang juga dilakukan penelitian eksperimental untuk menguji variabel-variabel terkait, seperti intensitas hujan, sudut atap, distribusi beban.

Setelah konsep perancangan ini dimatangkan, maka konstruksi prototipe atap menggunakan piezoelektrik segera dilaksanakan. Untuk penelitian dan pengembangan lebih lanjut, rekomendasi yang dapat diberikan adalah desain prototipe skala penuh, berbagai tipe atap, dan analisis umur pakai untuk memastikan keandalan sistem dalam jangka panjang.

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- [1] Y. Wu, Y. Ma, H. Zheng, and S. Ramakrishna, "Piezoelectric materials for flexible and wearable electronics: A review," *Mater. Des.*, vol. 211, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110164.
- [2] C. Covaci and A. Gontean, "Piezoelectric energy harvesting solutions: A review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 12, pp. 1–37, 2020, doi: 10.3390/s20123512.
- [3] Z. Yang, S. Zhou, J. Zu, and D. Inman, "High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications," *Joule*, vol. 2, no. 4, pp. 642–697, 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.03.011.
- [4] R. Mishra, S. Jain, and C. D. Prasad, "A review on piezoelectric material as a source of generating electricity and its possibility to fabricate devices for daily uses of army personnel," *Int. J. Syst. Control Commun.*, vol. 6, no. 3, pp. 212–221, 2015, doi: 10.1504/IJSCC.2015.068908.
- [5] D. G. Wakshume and M. Ł. Placzek, "Optimizing Piezoelectric Energy Harvesting from Mechanical Vibration for Electrical

- Efficiency: A Comprehensive Review,” *Electron.*, vol. 13, no. 5, 2024, doi: 10.3390/electronics13050987.
- [6] M. Safaei, H. A. Sodano, and S. R. Anton, “A review of energy harvesting using piezoelectric materials: State-of-the-art a decade later (2008-2018),” *Smart Mater. Struct.*, vol. 28, no. 11, 2019, doi: 10.1088/1361-665X/ab36e4.
- [7] K. V. Beard and C. Chuang, “A New Model for the Equilibrium Shape of Raindrops,” 1987. doi: 10.1175/1520-0469(1987)044<1509:anmft>2.0.co;2.
- [8] H. B. Wobus, F. W. Murray, and L. R. Koenig, “Calculation of the Terminal Velocity of Water Drops,” vol. 10, pp. 751–754, 1971.
- [9] M. Thurai, V. Bringi, P. Gatlin, and M. Wingo, “Raindrop fall velocity in turbulent flow: An observational study,” *Adv. Sci. Res.*, vol. 18, no. 2020, pp. 33–39, 2021, doi: 10.5194/asr-18-33-2021.
- [10] V. Bringi, M. Thurai, and D. Baumgardner, “Raindrop fall velocities from an optical array probe and 2-D video disdrometer,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 11, no. 3, pp. 1377–1384, 2018, doi: 10.5194/amt-11-1377-2018.
- [11] G. B. Foote and P. S. Du Toit, “Terminal Velocity of Raindrops Aloft,” 1969. doi: 10.1175/1520-0450(1969)008<0249:tvora>2.0.co;2.
- [12] M. I. Bin, “Design and Analysis of Piezoelectric Configuration for Raindrop Energy Harvester Muhammad Izrin Bin Izhah Universiti Sains Malaysia 2018 Design and Analysis of Piezoelectric Configuration for Raindrop Energy Harvester,” 2018.
- [13] F. Y. Testik and A. Bolek, “Wind and Turbulence Effects on Raindrop Fall Speed,” *J. Atmos. Sci.*, vol. 80, no. 4, pp. 1065–1086, 2023, doi: 10.1175/JAS-D-22-0137.1.
- [14] R. Gunn and G. D. Kinzer, “the Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air,” 1949. doi: 10.1175/1520-0469(1949)006<0243:ttvoff>2.0.co;2.
- [15] R. S. Dahiya and M. Valle, *Robotic tactile sensing: Technologies and system*, vol. 9789400705791. 2014. doi: 10.1007/978-94-007-0579-1.
- [16] W. G. Cady, *Piezoelectricity: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals*, 1st ed. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1946.
- [17] J.-F. Li, *Lead-Free Piezoelectric Materials*. Weinheim: Wiley-VCH, 2021.
- [18] N. Sezer and M. Koç, “A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting,” *Nano Energy*, vol. 80, no. August 2020, 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105567.
- [19] H. S. Kim, J. H. Kim, and J. Kim, “A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 12, no. 6, pp. 1129–1141, 2011, doi: 10.1007/s12541-011-0151-3.
- [20] H. Shaukat, A. Ali, S. Bibi, W. A. Altabey, M. Noori, and S. A. Kouritem, “A Review of the Recent Advances in Piezoelectric Materials, Energy Harvester Structures, and Their Applications in Analytical Chemistry,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 3, 2023, doi: 10.3390/app13031300.
- [21] A. Ali, S. Iqbal, and X. Chen, “Recent advances in piezoelectric wearable energy harvesting based on human motion: Materials, design, and applications,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 53, no. April, p. 101422, 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101422.
- [22] D. Amalia *et al.*, “Application Of Piezoelectric Energy Harvesting At Airports: Energy Sources, Materials And Design,” *INTECOMS J. Inf. Technol. Comput. Sci.*, vol. 7, no. 5, pp. 1561–1571, 2024, doi: 10.31539/intecomsv7i5.11807.
- [23] E. Brusa, A. Carrera, and C. Delprete, “A Review of Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Design, and Readout Circuits,” *Actuators*, vol. 12, no. 12, 2023, doi: 10.3390/act12120457.
- [24] B. Li, Z. Xie, H. Liu, L. Tang, and K. Chen, “A Review of Ultrathin Piezoelectric Films,” *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 8, 2023, doi: 10.3390/ma16083107.
- [25] Q. He and J. Briscoe, “Piezoelectric Energy Harvester Technologies: Synthesis, Mechanisms, and Multifunctional Applications,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 16, no. 23, pp. 29491–29520, 2024, doi: 10.1021/acsami.3c17037.
- [26] B. ZHANG, H. LIU, S. ZHOU, and J. GAO, “A review of nonlinear piezoelectric energy harvesting interface circuits in discrete components,” *Appl. Math. Mech.*, vol. 43, no. 7, pp. 1001–1026, 2022.
- [27] M. Üç and C. Elitaş, “Life Cycle Costing for Sustainability,” in *Handbook of Research on Waste Management Techniques for Sustainability*, no. Life Cycle Cost, 2016, pp. 96–107. doi: 10.4018/978-1-4666-9723-2.ch005.
- [28] A. Aabid *et al.*, “A systematic review of piezoelectric materials and energy harvesters for industrial applications,” *Sensors*, vol. 21, no. 12, pp. 1–27, 2021, doi: 10.3390/s21124145.
- [29] L. Shehu, J. H. Yeon, and Y. Song, “Piezoelectric Energy Harvesting for Civil Engineering Applications,” *Energies*, vol. 17, no. 19, pp. 1–33, 2024, doi: 10.3390/en17194935.