

Review Studi Konfigurasi Rangkaian Piezoelektrik (Seri vs Paralel) dalam Pemanenan Energi Hujan

Reyhan Martin Firnanda, & Rifky

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 : reyhanmartin891@gmail.com, Corresponding author : rifky@uhamka.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh konfigurasi rangkaian piezoelektrik tipe seri dan paralel terhadap kemampuan sistem dalam memberikan arus yang lebih besar serta kestabilan daya yang lebih baik. Adapun tujuan penelitian adalah untuk mendapatkan daya listrik yang lebih besar dari rangkaian seri dan paralel. Metode penelitian ini dilakukan dengan membandingkan rangkaian seri dan rangkaian paralel pada sejumlah pizeoelektrik yang akan menghasilkan tegangan dan arus listrik. Pada pengolahan data akan diperoleh daya listrik dan efisiensi sistem konversi energi mekanik menjadi listrik yang dalam hal ini pada pizeoelektrik. Hasil penelitian mendapatkan bahwa tipe rangkaian pizeoelektrik berpengaruh terhadap daya listrik dan efisiensi. Hal ini menunjukkan penggunaan piezoelektrik sebagai alat pemanen energi dapat menjadi solusi alternatif untuk menghasilkan energi listrik berskala kecil yang ramah lingkungan.

Kata Kunci: piezoelektrik, energi hujan, pemanenan, rangkaian seri, rangkaian paralel

Abstract

This study aims to examine the effect of series and parallel piezoelectric circuit configurations on the system's ability to deliver greater current and better power stability. The objective of the study is to obtain greater electrical power from series and parallel circuits. This research method is carried out by comparing series and parallel circuits on a number of piezoelectrics that will produce voltage and electric current. Data processing will obtain electrical power and the efficiency of the mechanical energy conversion system into electricity, in this case the piezoelectric. The results found that the type of piezoelectric circuit affects electrical power and efficiency. This shows that the use of piezoelectrics as an energy harvesting device can be an alternative solution for producing small-scale, environmentally friendly electrical energy.

Keywords: piezoelectric, rain energy, harvesting, series circuit, parallel circuit

1 PENDAHULUAN

Krisis energi global mendorong berbagai upaya berkelanjutan untuk mengembangkan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan, terbarukan, dan efisien. Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil telah menyebabkan penurunan cadangan energi non-renewable serta peningkatan emisi gas rumah kaca yang memperburuk perubahan iklim. Kondisi tersebut menuntut hadirnya teknologi konversi energi baru yang mampu memanfaatkan potensi energi di sekitar kita—baik dari matahari, angin, panas bumi, maupun energi mekanik—untuk dikonversi menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan secara langsung.

Salah satu bentuk energi mekanik yang potensial namun sering diabaikan adalah energi kinetik dari rintik hujan. Indonesia sebagai negara tropis dengan curah hujan tinggi mencapai 2000–4000 mm per tahun menurut BMKG (2023) memiliki potensi besar

dalam pemanfaatan energi mekanik dari tetesan air hujan. Setiap tetes air mengandung energi kinetik yang meskipun kecil secara individual, dalam jumlah besar dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui efek piezoelektrik. Teknologi ini memanfaatkan sifat material yang mampu menghasilkan muatan listrik ketika menerima tekanan atau deformasi mekanik [1].

Dalam konteks pemanenan energi hujan, tekanan akibat tumbukan air pada permukaan atap dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui elemen piezoelektrik yang dipasang di bawah permukaan tersebut. Sistem atap yang terintegrasi dengan susunan piezoelektrik berpotensi menyuplai energi untuk aplikasi skala kecil seperti penerangan otomatis, sensor cuaca, hingga perangkat *Internet of Things* (IoT) di lingkungan rumah tangga dan perkotaan [2].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa konfigurasi rangkaian sangat memengaruhi efisiensi sistem pemanenan energi. Moonik et al. menemukan

bahwa rangkaian seri menghasilkan tegangan lebih besar dibandingkan paralel pada variasi ketinggian tetesan air hujan [3]. Hasil serupa ditunjukkan oleh Lumintang et al., di mana simulasi berbasis ANSYS pada curah hujan intens menghasilkan tegangan hingga 0,00024623 V, menandakan adanya ruang optimasi melalui konfigurasi rangkaian dan komponen pendukung [1].

Ekawita et al. [4] melaporkan bahwa susunan seri mampu menghasilkan tegangan hingga 3,5 V pada energi mekanik 3,6 Joule, sementara konfigurasi paralel memberikan arus yang lebih besar dan respons yang lebih stabil. Yusran et al. [5] memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa modifikasi material dan penggunaan konfigurasi seri dapat meningkatkan efisiensi konversi hingga 105,51%. Selain berbasis hujan, teknologi piezoelektrik juga telah diterapkan pada pemanenan energi mekanik lainnya. Silalahi et al. [2] merancang prototipe pembangkit energi berbasis rantai piezoelektrik dengan 18 sensor berdiameter 35 mm yang mampu menyalakan lampu LED rumah tangga dengan tegangan hingga 7,17 V, membuktikan bahwa teknologi ini adaptif terhadap berbagai sumber tekanan lingkungan.

Dengan demikian, kajian mengenai konfigurasi rangkaian seri dan paralel dalam pemanenan energi hujan menjadi penting untuk dilakukan. Fokus kajian tidak hanya pada karakteristik material, tetapi juga pada optimasi susunan rangkaian agar dicapai keseimbangan antara tegangan yang tinggi dan stabilitas arus. Dengan desain yang tepat, sistem atap berbasis piezoelektrik berpotensi menjadi solusi inovatif yang berfungsi ganda sebagai pelindung bangunan dan perangkat konversi energi, sekaligus mendukung transisi menuju teknologi energi hijau di wilayah tropis.

Tinjauan pustaka dalam artikel ini disusun menggunakan pendekatan naratif dengan menyeleksi literatur relevan dari Google Scholar, Scopus, ScienceDirect, dan MDPI. Pemilihan artikel dilakukan berdasarkan kata kunci seperti *piezoelectric energy harvesting*, *raindrop energy harvesting*, *series-parallel piezoelectric configuration*, dan *rain-based energy harvester*, dengan rentang publikasi 2017–2025. Seleksi dilakukan melalui telaah judul, abstrak, dan kesesuaian isi terhadap fokus kajian, yaitu perbandingan performa rangkaian seri dan paralel.

Tujuan tinjauan ini adalah menganalisis secara terukur pengaruh konfigurasi rangkaian seri dan paralel terhadap keluaran tegangan, arus, dan efisiensi sistem pemanen energi hujan berbasis

piezoelektrik. Secara khusus, kajian ini membandingkan performa kedua konfigurasi berdasarkan besaran tegangan puncak, karakteristik arus, kestabilan daya, serta kecocokan masing-masing rangkaian terhadap jenis beban. Dengan penetapan indikator performa tersebut, studi ini diharapkan memberikan gambaran yang lebih terarah mengenai konfigurasi rangkaian yang paling sesuai untuk aplikasi pemanen energi hujan skala kecil.

2 PENGANTAR EFEK PIZOELEKTRIK

Efek piezoelektrik adalah kemampuan sebagian bahan untuk menghasilkan muatan listrik ketika dikenai tekanan mekanik dan sebaliknya mengalami deformasi ketika diberi medan listrik. Fenomena ini muncul karena adanya ketidaksimetrisan dalam struktur kristal bahan piezoelektrik sehingga gaya mekanik menyebabkan pergeseran pusat muatan positif dan negatif, menghasilkan polarisasi listrik dan beda potensial pada elektroda. Dalam aplikasi rekayasa, efek ini dimanfaatkan baik secara langsung mekanik ke listrik maupun terbalik listrik ke mekanik untuk fungsi penginderaan, aktuasi, dan pemanenan energi. Sebagai contoh riil, kristal kuarsa, keramik PZT (*Lead Zirconate Titanate*), dan polimer PVDF (*Polyvinylidene Fluoride*) adalah material dengan karakter piezoelektrik yang umum digunakan di berbagai skala sistem [6], [7].

Dalam konteks pemanenan energi hujan, efek piezoelektrik diaplikasikan untuk menangkap energi impuls singkat yang dilepaskan ketika tetesan air menghantam permukaan yang sensitif secara piezoelektrik. Setiap tumbukan tetesan menghasilkan sinyal tegangan singkat; bila sinyal-sinyal ini dikondisikan dan disimpan secara efektif, mereka dapat mensuplai daya ke sensor *low-power* atau node IoT. Keunggulan metode ini adalah kesederhanaan dan kemampuan beroperasi tanpa sumber eksternal, sementara keterbatasannya meliputi energi unit yang kecil, kebutuhan antarmuka elektronik yang efisien, serta degradasi material di lingkungan luar yang lembap. Strategi desain yang umum melibatkan pemilihan material yang tahan lembap (misalnya PVDF atau komposit yang terlapis), optimasi struktur mekanik untuk memperbesar deformasi lokal, serta pengaturan rangkaian elemen dalam susunan seri/paralel untuk mendapatkan tegangan dan arus yang sesuai kebutuhan beban [8], [9].

3 MEKANISME FISIKA EFEK PIZOELEKTRIK

Secara fisika, mekanisme piezoelektrik dijelaskan oleh hubungan konstitutif linear yang menghubungkan regangan mekanik, tegangan, medan listrik, dan perpindahan listrik. Persamaan konstitutif efek piezoelektrik langsung dan kebalikan dinyatakan sebagai berikut [10]:

$$D = dT + \epsilon E \text{ (Efek langsung)} \quad (1)$$

$$X = sT + dE \text{ (Efek kebalikan)} \quad (2)$$

dimana D adalah perpindahan listrik, koefisien piezoelektrik d , tegangan T , ϵ permitivitas material, medan listrik E , regangan X , dan kelenturan mekanis [10].

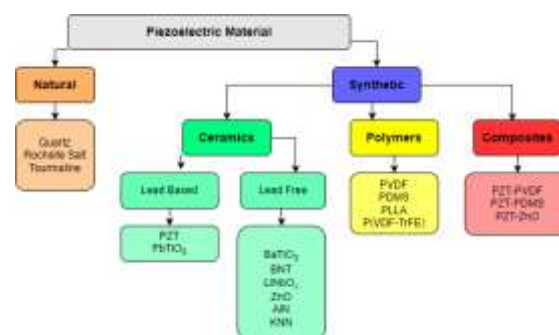
Dalam bentuk matriks sederhana, hubungan dapat dinyatakan sebagai kombinasi persamaan mekanik dan listrik yang melibatkan konstanta piezoelektrik d_{ij} serta permitivitas ϵ . Besarnya konstanta d_{ij} merupakan parameter kunci yang menunjukkan seberapa banyak muatan listrik dihasilkan per satuan gaya; nilai ini berbeda antar material dan orientasi kristal d_{33} berbeda dengan d_{31} . Dalam aplikasi praktis, mode kerja d_{33} atau d_{31} dipilih berdasarkan geometri perangkat: mode d_{33} biasanya memberikan respon lebih tinggi untuk gaya searah, sementara d_{31} berguna untuk konfigurasi bending seperti cantilever.

Untuk kejadian impuls seperti tumbukan tetesan hujan, respons piezoelektrik bersifat transient dan seringkali *broadband* (mengandung banyak komponen frekuensi). Desain struktur yang efektif untuk menangkap energi dari impuls pendek berbeda dari desain untuk getaran sinusoidal kontinu; struktur non-resonan atau sistem dengan bandwidth lebar (misalnya menggunakan materi viskoelastik atau bentuk multilayer) akan lebih efektif. Selain itu, ketika beberapa elemen piezoelektrik dikombinasikan, interaksi elektrik dan mekanik antar elemen (termasuk impedansi internal dan coupling mekanik) mempengaruhi distribusi energi. Oleh karena itu, pemodelan ekuivalen rangkaian—yang memperlakukan setiap elemen sebagai sumber tegangan internal dengan impedansi seri/paralel—sangat berguna untuk merancang array seri, paralel, atau hybrid seri-paralel yang optimal [11], [12].

4 MATERIAL PIZOELEKTRIK

Material piezoelektrik adalah jenis material yang dapat menghasilkan muatan listrik sebagai reaksi terhadap tekanan atau deformasi mekanis, serta mengalami deformasi mekanis ketika terpapar medan listrik. Efek piezoelektrik merupakan fitur reversibel

dari karakteristik ini. Ketika material piezoelektrik dikenai gaya atau tekanan mekanis, lokasi atom atau ion bermuatan di dalam struktur kisi kristal material berubah. Transfer muatan ini menyebabkan potensial atau tegangan listrik dihasilkan di seluruh material. Efek piezoelektrik langsung dan terbalik dapat dibedakan [6], [13], [14]. Ketika tekanan mekanis menyebabkan penumpukan muatan listrik dalam suatu material, efek piezoelektrik langsung terjadi. Efek ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk sensor dan transduser piezoelektrik. Kebalikan dari efek langsung adalah efek piezoelektrik terbalik. Ketika material piezoelektrik dikenai medan listrik, material tersebut mengalami deformasi atau perubahan bentuk. Fenomena ini digunakan dalam aktuator piezoelektrik dan motor. Piezoelektrik ditemukan pada material yang tidak memiliki pusat simetri dan memiliki momen dipol total selain nol. Material piezoelektrik memiliki tiga mode operasi. Mode d_{33} , juga dikenal sebagai mode longitudinal, adalah mode operasi di mana arah polarisasi dan tegangan sejajar; mode ini direkomendasikan untuk aplikasi seperti pemanenan energi piezoelektrik. Mode d_{31} , juga dikenal sebagai mode transversal, adalah mode di mana arah polarisasi dan tegangan yang diberikan tegak lurus satu sama lain. Mode ketiga adalah mode geser paralel d_{15} , yang terjadi ketika muatan dikumpulkan pada elektroda yang tegak lurus terhadap elektroda polarisasi awal dan gaya mekanis geser diterapkan [15]. Bagian ini membandingkan dan memeriksa berbagai subkelas bahan piezoelektrik sintesis (keramik, polimer, dan komposit), seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Klasifikasi bahan piezoelektrik [7]

1. Piezoelectric Ceramics

Keramik piezoelektrik banyak digunakan karena sifat piezoelektriknya yang tinggi, ketahanan terhadap suhu, dan kestabilannya. Umumnya, material ini memiliki struktur perovskit dan bersifat polikristalin. Di antara berbagai jenis yang ada, timbal zirkonat titanat (PZT) merupakan yang paling

luas digunakan karena memiliki konstanta piezoelektrik tinggi serta koefisien kopling elektromekanis yang besar, memungkinkan efisiensi konversi energi yang tinggi [16]. Keramik seperti PZT masih mendominasi aplikasi transduser dan aktuator karena stabilitasnya yang baik pada suhu hingga 350 °C, meskipun memiliki kelemahan berupa kerapuhan, densitas tinggi, dan biaya produksi yang mahal [17], [18].

2. Polimer Piezoelektrik

Berbeda dengan keramik, material polimer piezoelektrik seperti *polyvinylidene fluoride* (PVDF) memiliki sifat yang lebih fleksibel, ringan, serta mudah dibentuk ke berbagai geometri kompleks. Polimer dapat berfungsi baik secara mandiri maupun dalam bentuk komposit piezoelektrik, di mana material anorganik piezoelektrik dimasukkan ke dalam matriks polimer untuk meningkatkan konstanta piezoelektriknya. Komposit semacam ini menggabungkan keunggulan mekanik polimer dengan kinerja listrik material anorganik, menghasilkan kombinasi yang efisien untuk aplikasi fleksibel [19].

Selain itu, komposit termosit piezoelektrik menunjukkan peningkatan karakteristik mekanik dan sensitivitas sensorik, sebagaimana dijelaskan [20]. Upaya modifikasi kimia juga terus dikembangkan untuk meningkatkan kompatibilitas antarfase dan efisiensi transfer muatan dalam material komposit, seperti dijelaskan dalam ulasan [21].

3. Kristal Tunggal

Material piezoelektrik berbasis kristal tunggal mencakup kristal alami seperti kuarsa dan garam Rochelle, serta kristal sintetis seperti PMN-PT, PIN-PT, dan PZN-PT. Kristal sintetis ini memiliki keunggulan berupa konstanta piezoelektrik sangat tinggi, di mana nilai d_{33} dapat mencapai 2500–3400 pC/N dengan efisiensi kopling elektromekanis melebihi 90%. Meski demikian, material ini memiliki biaya produksi yang tinggi dan proses sintesis yang kompleks. Seperti yang dijelaskan dalam tinjauan [18], kristal tunggal memberikan performa superior tetapi sulit diaplikasikan secara massal karena keterbatasan fabrikasi dan ketahanan mekaniknya. Adapun Gambar 2 perbandingan pada material piezoelektrik [22]

Table 3. Piezoelectric coupling coefficients of different piezoelectric inorganic and organic materials

Compound	Material	Type	Piezoelectric constants		Ref.
			d_{33} (pC/N ⁻¹)	d_{31} (pC/N ⁻¹)	
Inorganic	α-Quartz	Single crystal	2.31	–	[37]
	LiNbO ₃		6	–1	[37]
	PMN-PT		2580	–	[42]
	PZN-PT	Ceramic	2455	–1204	[40]
	PIN-PT		1400	–	[41]
	ADN		5.5	–2.4	[43]
	BaTiO ₃		191	–76	[35]
Organic	PZT-SA	Polymer	374	–171	[40]
	PZT-SH		650	–320	[35]
	PVDF		29	–	[39]
	Polyimide		2.5–10.5	–	[35]

Gambar 2 klasifikasi pada material piezoelektrik. [22]

5 KARAKTERISTIK DAN PARAMETER KINERJA PIEZOELEKTRIK

Karakteristik piezoelektrik dan parameter kinerjanya sangat bergantung pada jenis material yang digunakan, di mana material ini tergolong sebagai bahan pintar (*smart material*) karena memiliki kemampuan menghasilkan tegangan listrik ketika dikenai tekanan mekanik, serta mengalami perubahan bentuk atau dimensi saat diberi medan listrik. Material piezoelektrik berbasis *lead zirconate titanate* (PZT) umumnya menunjukkan performa listrik yang tinggi, namun memiliki sejumlah keterbatasan seperti sifat getas, suhu leleh rendah, densitas tinggi, dan biaya produksi yang relatif mahal [17]. Keterbatasan tersebut menyebabkan penerapan PZT terbatas pada permukaan yang melengkung, bersudut, atau aplikasi yang membutuhkan fleksibilitas mekanik tinggi.

Sebaliknya, material polimer seperti *polyvinylidene fluoride* (PVDF) menawarkan keunggulan berupa fleksibilitas, ringan, kekuatan mekanik tinggi, kemudahan pembentukan dalam berbagai geometri kompleks, serta ketahanan terhadap benturan [23]. PVDF memiliki fase kristal β yang memberikan kontribusi dominan terhadap sifat piezoelektrik dan piroelektriknya, di mana fase ini dapat ditingkatkan melalui metode fabrikasi tertentu seperti *electrospinning*, *mechanical stretching*, atau penambahan nanopartikel logam oksida [24], [25]. Selain itu, PVDF tidak hanya berfungsi sebagai sensor mekanik, tetapi juga dapat dimanfaatkan sebagai sensor atau detektor inframerah karena sifat piroelektriknya yang mampu mengubah energi panas menjadi energi listrik melalui perubahan muatan permukaan [23].

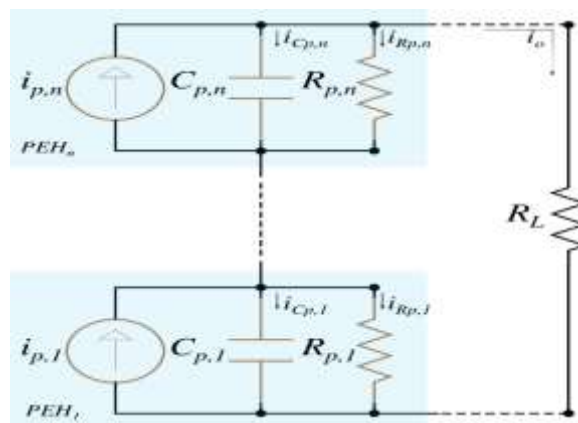
Dalam berbagai penelitian, material komposit PVDF—misalnya PVDF yang dikombinasikan dengan *barium titanate* (BaTiO_3) atau PZT—menunjukkan peningkatan signifikan dalam densitas daya dan sensitivitas piezoelektrik [26]. Struktur β -fase yang lebih stabil serta peningkatan konstanta piezoelektrik d_{33} pada material tersebut menunjukkan bahwa kombinasi material dapat mengoptimalkan parameter kinerja seperti sensitivitas, responsivitas, dan kestabilan siklus dalam aplikasi sensor dan *energy harvesting* [24], [26]. Untuk memahami secara menyeluruh perilaku material aktif seperti PVDF terhadap berbagai kondisi kerja, sejumlah kajian eksperimental dilakukan melalui variasi ketebalan film, pembebanan lentur, tumbukan mekanik, penerapan medan listrik, serta pemberian sumber panas [27]. Pendekatan tersebut memungkinkan karakterisasi yang lebih detail terhadap parameter kinerja utama material piezoelektrik yang mencerminkan potensi aplikasinya pada teknologi sensor fleksibel dan *nanogenerator* masa depan [25], [27].

6 RANGKAIAN SERI DAN PARALEL

Koneksi Seri

Pada konfigurasi rangkaian seri sistem *Piezoelectric Energy Harvester* (PEH), beberapa elemen piezoelektrik dihubungkan secara berurutan membentuk satu jalur arus tunggal. Dalam susunan ini, arus (i_p) yang mengalir melalui setiap elemen memiliki nilai yang sama, sedangkan tegangan total (V_{total}) merupakan hasil penjumlahan dari tegangan masing-masing unit. Konfigurasi seri sangat efektif untuk aplikasi yang memerlukan tegangan keluaran tinggi, mengingat sifat aditif tegangan dari setiap elemen [28].

Agar rangkaian seri berfungsi optimal, seluruh unit PEH harus mengalami getaran mekanik yang seragam. Ketidaksamaan amplitudo getaran dapat menyebabkan ketidakkonsistenan pada tegangan keluaran dan menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Dalam implementasinya, setiap unit PEH umumnya diposisikan berdekatan dan dirancang secara hati-hati untuk memastikan keseragaman deformasi mekanik serta konversi energi yang stabil [29]. Adapun Gambar 3 Pada Sirkuit seri dari sistem PEH[9]



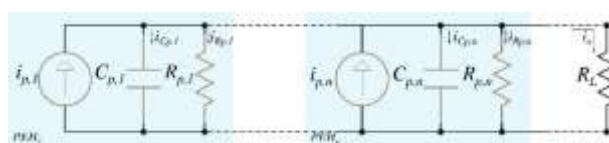
Gambar 3 Sirkuit seri dari sistem PEH[9]

Berdasarkan penelitian terbaru oleh Moreno et al. (2025) [9], pemodelan matematis konfigurasi seri dapat ditingkatkan akurasinya melalui pengembangan model rangkaian setara yang dioptimalkan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa dengan mempertimbangkan jumlah unit PEH (n_s) dan efek kumulatif dari kapasitansi serta resistansi internal setiap elemen, dapat diciptakan model kelistrikan yang lebih komprehensif dan akurat untuk konfigurasi seri. Model ini memungkinkan prediksi performa sistem yang lebih baik dan optimasi desain yang lebih efektif.

Koneksi Paralel

Sebaliknya, pada konfigurasi paralel, beberapa unit PEH dihubungkan sedemikian rupa sehingga setiap elemen mengalami tegangan yang sama, sementara arus total (i_{total}) yang dihasilkan merupakan penjumlahan dari arus masing-masing unit. Rangkaian paralel sangat menguntungkan ketika dibutuhkan keluaran arus yang lebih tinggi, karena setiap elemen berkontribusi langsung terhadap arus total sistem [28].

Dalam susunan ini, keseragaman tegangan memastikan semua elemen bekerja pada potensial listrik yang sama, menghasilkan konversi energi yang lebih konsisten. Keunggulan utama konfigurasi paralel adalah kemampuannya menghasilkan arus besar dengan penurunan tegangan yang relatif kecil, sehingga cocok untuk aplikasi penyimpanan energi seperti pengisian kapasitor atau superkapasitor [30]. Adapun Gambar 4 Pada Sirkuit paralel dari sistem PEH[9]



Gambar 4 Sirkuit Paralel dari Sistem PEH[9]

Menurut Moreno et al. (2025) [9], meskipun konfigurasi paralel relatif lebih toleran terhadap variasi kecil pada karakteristik elemen, variasi signifikan pada parameter seperti kapasitansi internal tetap dapat menyebabkan ketidakseimbangan distribusi arus. Oleh karena itu, pemilihan konfigurasi paralel perlu mempertimbangkan keseragaman material dan desain mekanik, serta dapat dioptimalkan melalui penerapan model rangkaian setara yang memadai untuk menjaga kinerja optimal sistem.

Berdasarkan hasil peninjauan terhadap berbagai penelitian, konfigurasi seri dan paralel menunjukkan kecenderungan performa yang konsisten. Melaporkan bahwa susunan seri menghasilkan tegangan hingga 3,5 V ketika menerima energi mekanik sebesar 3,6 Joule, sedangkan konfigurasi paralel pada kondisi yang sama hanya mencapai sekitar 1,8–2,0 V namun menghasilkan arus yang lebih besar [4]. Temuan lain juga memperkuat hal tersebut, di mana rangkaian seri memberikan peningkatan tegangan hingga dua kali lipat dibandingkan paralel pada variasi intensitas tetesan hujan [3]. Sementara itu, temuan serupa menunjukkan bahwa modifikasi material piezoelektrik dalam susunan seri mampu meningkatkan efisiensi konversi hingga 105%, terutama ketika elemen mengalami deformasi seragam. Secara keseluruhan, literatur mengindikasikan bahwa rangkaian seri lebih unggul dalam menghasilkan tegangan puncak, sedangkan paralel memberikan suplai arus yang lebih stabil untuk keperluan pengisian kapasitor atau superkapasitor [5].

7 PENERAPAN PIZOELEKTRIK DALAM TEKNOLOGI

Pemanfaatan teknologi piezoelektrik mengalami perkembangan signifikan, khususnya dalam sistem pemanenan energi (*energy harvesting*) yang memanfaatkan energi mekanik dari getaran, tekanan, atau tumbukan di lingkungan sekitar sebagai sumber energi alternatif. Salah satu penerapan inovatifnya adalah pada pemanenan energi hujan, di mana energi kinetik dari tetesan air hujan dikonversi menjadi energi listrik melalui elemen piezoelektrik yang dipasang pada permukaan fleksibel atau substrat yang dapat bergetar. Ketika tetesan hujan mengenai permukaan tersebut, terjadi deformasi mekanik yang menimbulkan perubahan distribusi muatan pada material piezoelektrik sehingga menghasilkan tegangan listrik yang dapat disimpan atau

dimanfaatkan untuk menyalakan perangkat berdaya rendah seperti sensor dan modul nirkabel [31].

Susunan rangkaian seri dan paralel pada elemen piezoelektrik berperan penting dalam menentukan karakteristik output sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi seri mampu meningkatkan tegangan keluaran namun menghasilkan arus yang relatif kecil, sedangkan rangkaian paralel memberikan arus yang lebih besar dengan tegangan lebih rendah [9]. Oleh sebab itu, pemilihan konfigurasi yang tepat disesuaikan dengan jenis beban dan kapasitas sistem penyimpanan energi yang digunakan. Penelitian oleh Mahyudin dan Syahfandi (2016) melaporkan bahwa konfigurasi seri menghasilkan peningkatan tegangan hingga dua kali lipat dibandingkan konfigurasi paralel pada sistem pemanen energi hujan berbasis piezoelektrik di Indonesia [32]. Sementara itu, D. Gryzbek et al. (2021) dalam jurnal *Energies* menegaskan bahwa kombinasi seri-paralel memberikan hasil paling optimal dengan efisiensi daya tertinggi pada sistem piezoelektrik berlapis (multilayer) [33].

Secara umum, keberhasilan sistem pemanen energi piezoelektrik bergantung pada sinergi antara desain mekanik dan konfigurasi kelistrikan. Integrasi keduanya mampu meningkatkan efisiensi konversi energi secara signifikan. Dengan pendekatan tersebut, teknologi pemanen energi hujan berbasis piezoelektrik memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan skala kecil yang sesuai untuk diterapkan di wilayah beriklim tropis seperti Indonesia.

Meskipun konfigurasi seri memberikan tegangan lebih tinggi, analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa performa aktual sangat dipengaruhi oleh impedansi internal masing-masing elemen piezoelektrik. Pada susunan seri, perbedaan kecil pada kapasitansi atau respons mekanik antar sensor dapat menurunkan keseimbangan tegangan dan menyebabkan fluktuasi output. Sebaliknya, rangkaian paralel relatif lebih stabil karena setiap elemen bekerja pada tegangan yang sama, namun arus total menjadi sensitif terhadap variasi impedansi internal. Selain itu, sebagian besar studi yang direview menggunakan simulasi hujan buatan dengan debit dan tekanan yang relatif seragam, sehingga belum sepenuhnya mewakili kondisi hujan alami yang memiliki variabilitas tinggi dalam ukuran tetesan, kecepatan, dan intensitas. Keterbatasan ini menunjukkan perlunya studi lanjutan berbasis pengujian lapangan serta model rangkaian ekuivalen yang mempertimbangkan faktor umur material, kelembapan lingkungan, dan efek resonansi mekanik.

8 PENELITIAN TERKINI DAN TREN PIZOELEKTRIK

Dalam lima tahun terakhir, penelitian di bidang piezoelektrik mengalami perkembangan yang pesat seiring meningkatnya kebutuhan terhadap teknologi energi terbarukan skala mikro dan perangkat elektronik fleksibel. Fokus utama riset terkini mencakup pengembangan material baru yang ramah lingkungan, peningkatan efisiensi konversi energi mekanik menjadi listrik, serta integrasi sistem piezoelektrik dengan perangkat modern seperti Internet of Things (IoT), *wearable devices*, dan aplikasi biomedis. Tren global menunjukkan pergeseran dari penelitian berbasis material konvensional menuju teknologi multifungsi yang lebih berkelanjutan dan adaptif.

Salah satu arah riset penting adalah pemanfaatan energi mekanik dari aktivitas manusia melalui sistem pemanen energi berbasis infrastruktur. Melakukan studi awal implementasi transduser piezoelektrik pada lantai cerdas (*piezo tile*) untuk mengubah tekanan langkah manusia menjadi energi listrik [34]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material keramik menghasilkan tegangan lebih tinggi dibandingkan PVDF, meskipun PVDF memiliki fleksibilitas yang lebih baik. Studi ini memperlihatkan potensi besar penerapan *smart flooring system* untuk menghasilkan energi mikro di area publik dan fasilitas transportasi.

Selain itu, pengembangan material piezoelektrik untuk tekstil pintar (*smart textiles*) juga menjadi tren signifikan. Melaporkan kemajuan bahan tekstil piezoelektrik berbasis PVDF, P(VDF-TrFE), dan komposit BTO/PVDF melalui proses *electrospinning*. Orientasi kristal dan pengaturan kelembapan selama fabrikasi terbukti mampu meningkatkan koefisien piezoelektrik hingga tiga kali lipat. Inovasi ini mendukung pengembangan pakaian medis cerdas dan sistem sensor fleksibel yang mampu memanen energi dari gerakan tubuh manusia [35].

Dari sisi material, arah penelitian modern juga menekankan keberlanjutan lingkungan. Meneliti polimer piezoelektrik biodegradable untuk aplikasi medis dan implan sementara, yang dapat terurai hayati dan bebas timbal (*lead-free*). Pendekatan ini sejalan dengan tuntutan global terhadap pengurangan dampak lingkungan dari penggunaan material PZT konvensional, sekaligus mendukung pengembangan *green technology* dan perangkat biokompatibel [36].

Perbaikan efisiensi konversi energi juga banyak dikaji melalui pendekatan desain struktural nonlinier.

Meninjau kemajuan teknologi *piezoelectric vibration energy harvesting* dengan fokus pada penerapan struktur multistabil seperti bistabil dan tristabil untuk memperluas rentang frekuensi operasi serta meningkatkan efisiensi konversi energi. Pendekatan ini terbukti efektif dalam memanfaatkan getaran berfrekuensi rendah yang sebelumnya sulit dikonversi secara optimal [37].

Bidang biomedis menunjukkan arah pengembangan yang sangat progresif. Mengulas potensi material piezoelektrik seperti PVDF, BaTiO₃, dan peptida piezoelektrik dalam stimulasi regenerasi jaringan saraf serta pengobatan penyakit neurodegeneratif seperti Alzheimer dan Parkinson. Efek piezoelektrik digunakan untuk menghasilkan stimulasi listrik mikro yang dapat memicu aktivitas biologis tanpa sumber daya eksternal, sehingga membuka peluang baru dalam terapi berbasis *self-powered bioelectronics* [38].

Dalam ranah interaksi manusia-mesin (*human-machine interaction*), Mengembangkan perangkat piezoelektrik fleksibel berbasis PVDF/ZnO dan *graphene heterostructure* yang berfungsi sebagai sensor sentuh dan gerak dengan sensitivitas tinggi. Sistem ini memungkinkan antarmuka cerdas yang bekerja tanpa catu daya eksternal, cocok untuk aplikasi pada robotika, realitas virtual (VR/AR), dan sistem kontrol berbasis sentuhan [39].

Upaya substitusi material konvensional juga terus dilakukan. Menyoroti perkembangan keramik piezoelektrik bebas timbal seperti Barium Titanate (BaTiO₃) dan Sodium Potassium Niobate (KNN) yang menunjukkan konstanta piezoelektrik tinggi dan kestabilan termal yang baik. Inovasi ini mendukung regulasi internasional yang melarang penggunaan timbal dalam perangkat elektronik berdaya tinggi, sekaligus memperluas potensi aplikasi industri piezokeramik [40], [41].

Selain pengembangan material, tren terkini juga mengarah pada integrasi sistem multienergi dan miniaturisasi. Menekankan bahwa penggabungan mekanisme piezoelektrik, elektromagnetik, dan triboelektrik dalam satu perangkat hibrida dapat meningkatkan densitas daya dan memperluas efisiensi kerja. Desain *hybrid energy harvester* ini dinilai potensial untuk sistem sensor nirkabel, perangkat IoT, serta sistem elektronik mikro yang membutuhkan sumber energi berkelanjutan tanpa baterai [37].

Secara keseluruhan, arah riset piezoelektrik terkini menegaskan pergeseran paradigma menuju pengembangan material ramah lingkungan, sistem fleksibel otonom, dan aplikasi lintas disiplin.

Piezoelektrik tidak lagi hanya berperan sebagai konverter energi, tetapi telah berevolusi menjadi komponen cerdas dalam sistem elektronik modern yang mendukung transisi menuju teknologi hijau dan digital mandiri energi.

9 PENUTUP

Review ini membahas konfigurasi rangkaian piezoelektrik seri dan paralel dalam sistem pemanenan energi hujan sebagai salah satu alternatif sumber energi terbarukan berskala kecil. Berdasarkan hasil telaah pustaka, konfigurasi rangkaian memiliki peran penting dalam menentukan karakteristik keluaran sistem. Rangkaian seri umumnya menghasilkan tegangan yang lebih tinggi, sedangkan rangkaian paralel memberikan arus lebih besar dan kestabilan daya yang lebih baik. Dengan demikian, pemilihan konfigurasi—atau kombinasi seri—paralel—harus disesuaikan dengan kebutuhan beban dan strategi penyimpanan energi.

Material piezoelektrik seperti PVDF dan BaTiO_3 terbukti mampu merespons tekanan mekanik dari tetesan hujan secara efektif, sehingga berpotensi digunakan dalam modul pemanen energi yang fleksibel, ringan, dan ramah lingkungan. Integrasi elemen piezoelektrik dalam susunan rangkaian yang tepat dapat meningkatkan kualitas daya serta memperbaiki efisiensi sistem saat dihubungkan dengan penyimpanan energi seperti super kapasitor atau baterai mikro.

Untuk pengembangan selanjutnya, diperlukan pengujian performa pada kondisi hujan alami, analisis ketahanan material terhadap kelembapan jangka panjang, serta integrasi rangkaian dengan sistem manajemen daya agar energi yang dihasilkan lebih stabil dan layak digunakan. Melalui pendekatan konfigurasi rangkaian yang dioptimalkan, teknologi pemanenan energi hujan berbasis piezoelektrik memiliki potensi besar sebagai solusi energi terbarukan yang aplikatif, khususnya untuk wilayah tropis seperti Indonesia.

KEPUSTAKAAN

- [1] J. Lumintang, J. Rantung, and B. Maluegha, “Pemodelan Konversi Energi Listrik Dari Curah Hujan Melalui Transduser Piezoelektrik Berbasis Ansys,” *J. Poros Tek. Mesin Unsrat*, vol. 13, no. 2, pp. 82–93, 2024.
- [2] B. W. Mila Anggreni Valemtina, Eva Magdalena Silalahi, “PERANCANGAN PROTOTYPE PEMBANGKIT PIEZOELEKTRIK LANTAI UNTUK SUPPLAI ENERGI LISTRIK LAMPU PENERANGAN PINTU MASUK RUMAH,” *JITET (Jurnal Inform. dan Tek. Elektro Ter.)*, vol. 13, no. January, pp. 1475–1485, 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i1.5983.
- [3] Arief, Jotje, and Benny, “Pemanen Energi Listrik Dari Curah Hujan Melalui Transduser Piezoelektrik Secara Seri Dan Paralel,” *J. Poros Tek. Mesin Unsrat*, vol. 12, pp. 1–12, 2022.
- [4] R. Ekawita, R. A. Salam, N. Kusumawardani, and E. Yuliza, “Pengujian Konfigurasi Piezoelektrik Penghasil Tegangan Listrik Dari Energi Mekanik,” *JoP*, vol. 6, no. 2, pp. 1–6, 2021.
- [5] G. Yusran *et al.*, “Analisis Tegangan Keluaran Piezoelektrik Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro Volume 11 Tahun 2025,” 2025.
- [6] C. Covaci and A. Gontean, “Piezoelectric Energy Harvesting Solutions : A Review,” 2020.
- [7] E. Brusa and A. Carrera, “A Review of Piezoelectric Energy Harvesting : Materials , Design , and Readout Circuits,” 2023.
- [8] M. A. Ilyas and J. Swinger, “Towards a prototype module for piezoelectric energy harvesting from raindrop impacts,” *Energy*, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.02.071.
- [9] M. Moreno, J. A. Morales-viscaya, and M. X. Cuevas-gayosso, “Optimized equivalent circuit models for series-parallel configurations of piezoelectric transducers in energy harvesting,” pp. 1–20, 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0323682.
- [10] N. Sezer and M. Koç, “A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting,” *Nano Energy*, vol. 80, no. November 2020, p. 105567, 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105567.
- [11] 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.
- [12] Y. Meng, G. Chen, and M. Huang, “Piezoelectric Materials: Properties, Advancements, and Design Strategies for High-Temperature Applications,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 7, 2022, doi: 10.3390/nano12071171.

- [13] S. R. Anton and H. A. Sodano, "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 3, 2007, doi: 10.1088/0964-1726/16/3/R01.
- [14] A. Erturk and D. J. Inman, "An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations," *Smart Mater. Struct.*, vol. 18, no. 2, 2009, doi: 10.1088/0964-1726/18/2/025009.
- [15] H. Liu, J. Zhong, C. Lee, S. W. Lee, and L. Lin, "A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 5, no. 4, 2018, doi: 10.1063/1.5074184.
- [16] D. Almanda, E. Dermawan, A. I. Ramadhan, E. Diniardi, and A. N. Fajar, "Analisis Desain Optimum Model Piezoelektrik PvdF Untuk Sumber Pembangkit Listrik Air Hujan Berskala Mini," *Semin. Nas. Sains dan Teknol. 2015*, no. November 2015, pp. 1–5, 2015, [Online]. Available: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/viewFile/493/459>
- [17] S. Mohammadpourfazel, S. Arash, A. Ansari, S. Yang, K. Mallick, and R. Bagherzadeh, "Future prospects and recent developments of polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric polymer; fabrication methods, structure, and electro-mechanical properties," *RSC Adv.*, vol. 13, no. 1, pp. 370–387, 2023, doi: 10.1039/d2ra06774a.
- [18] M. Habib, I. Lantgios, and K. Hornbostel, "A review of ceramic, polymer and composite piezoelectric materials," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 55, no. 42, 2022, doi: 10.1088/1361-6463/ac8687.
- [19] C. I. Pîrvu, A. Sover, and M. Abrudeanu, "Participation of Polymer Materials in the Structure of Piezoelectric Composites," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 24, 2024, doi: 10.3390/polym16243603.
- [20] R. M. Syriac, A. B. Bhasi, and Y. V. K. S. Rao, "A review on characteristics and recent advances in piezoelectric thermoset composites," *AIMS Mater. Sci.*, vol. 7, no. 6, pp. 772–787, 2020, doi: 10.3934/MATERSCI.2020.6.772.
- [21] W. Zhang, Y. Zhang, X. Yan, Y. Hong, and Z. Yang, "Challenges and progress of chemical modification in piezoelectric composites and their applications," *Soft Sci.*, vol. 3, no. 2, 2023, doi: 10.20517/ss.2022.33.
- [22] X. Zhou *et al.*, "Review on piezoelectric actuators: materials, classifications, applications, and recent trends," 2024. doi: 10.1007/s11465-023-0772-0.
- [23] V. O. C. Concha *et al.*, "Properties, characterization and biomedical applications of polyvinylidene fluoride (PVDF): a review," *J. Mater. Sci.*, vol. 59, no. 31, pp. 14185–14204, 2024, doi: 10.1007/s10853-024-10046-3.
- [24] S. P. Muduli, L. Lipsa, and S. Parida, "Current trends of characterization techniques for PVDF and related composite piezoelectric materials for nanogenerator," *Discov. Polym.*, vol. 2, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s44347-025-00025-5.
- [25] D. Kumar, P. Kumar, N. N. K. Borah, Siddhartha, M. Singh, and U. Singh, "Piezoelectric properties of PVDF and green synthesized metal oxide nanocomposite thin films," *Indian J. Phys.*, vol. 99, no. 8, pp. 2861–2868, 2025, doi: 10.1007/s12648-024-03526-4.
- [26] S. Mahboubizadeh, S. T. Dilamani, and S. Baghshahi, "Piezoelectricity performance and β -phase analysis of PVDF composite fibers with BaTiO₃ and PZT reinforcement," *Heliyon*, vol. 10, no. 3, p. e25021, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25021.
- [27] L. Paralı, "The output performance evaluations of multilayered piezoelectric nanogenerators based on the PVDF-HFP/PMN-35PT using various layer-by-layer assembly techniques," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 35, no. 11, pp. 1–20, 2024, doi: 10.1007/s10854-024-12557-w.
- [28] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes," *Comput. Commun.*, vol. 26, no. 11, pp. 1131–1144, 2003, doi: 10.1016/S0140-3664(02)00248-7.
- [29] 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.
- [30] S. Priya and D. J. Inman, *Energy harvesting technologies*. 2009. doi: 10.1007/978-0-387-76464-1.
- [31] F. Viola, P. Romano, R. Miceli, G. Acciari, and C. Spataro, "Piezoelectric model of rainfall energy harvester," *2014 9th Int. Conf. Ecol. Veh. Renew. Energies, EVER 2014*, 2014, doi: 10.1109/EVER.2014.6844093.
- [32] A. Sunard and A. Gamayel, "Pemanfaatan

- Pantulan Bola Karet sebagai Pemanen Energi pada Piezoelektrik,” *Pros. Semin. Nas. Teknoka*, vol. 3, no. 2502, p. 49, 2019, doi: 10.22236/teknoka.v3i0.2914.
- [33] D. Grzybek and P. Micek, “Impact of series and parallel connection of macro fiber composite patches in piezoelectric harvester on energy storage,” *Energies*, vol. 14, no. 9, 2021, doi: 10.3390/en14092379.
- [34] Y. Arimurti, Y. Radiyono, and S. Surantoro, “Studi Awal Implementasi Transduser Piezoelektrik sebagai Piranti Pemanen Energi pada Lantai,” *J. Ilmu Fis. | Univ. Andalas*, vol. 12, no. 2, pp. 89–97, 2020, doi: 10.25077/jif.12.2.89-97.2020.
- [35] G. Maestri, L. B. Ferreira, P. Bachmann, A. A. M. Paim, C. Merlini, and F. Steffens, “Recent advances in piezoelectric textile materials: A brief literature review,” *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 18, 2023, doi: 10.1177/15589250231151242.
- [36] M. Ali, M. J. Bathaei, E. Istif, S. N. H. Karimi, and L. Beker, “Biodegradable Piezoelectric Polymers: Recent Advancements in Materials and Applications,” *Adv. Healthc. Mater.*, vol. 12, no. 23, pp. 1–32, 2023, doi: 10.1002/adhm.202300318.
- [37] W. Zhou, D. Du, Q. Cui, C. Lu, Y. Wang, and Q. He, “Recent Research Progress in Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Technology,” *Energies*, vol. 15, no. 3, 2022, doi: 10.3390/en15030947.
- [38] X. Wang *et al.*, “Research trends of piezoelectric materials in neurodegenerative disease applications,” *Bioact. Mater.*, vol. 52, no. April, pp. 366–392, 2025, doi: 10.1016/j.bioactmat.2025.06.022.
- [39] J. Liu, G. Tian, W. Yang, and W. Deng, “Recent progress in flexible piezoelectric devices toward human-machine interactions,” *Soft Sci.*, vol. 2, no. 4, 2022, doi: 10.20517/ss.2022.23.
- [40] J. Rödel and J. F. Li, “Lead-free piezoceramics: Status and perspectives,” *MRS Bull.*, vol. 43, no. 8, pp. 576–580, 2018, doi: 10.1557/mrs.2018.181.
- [41] M. Acosta *et al.*, “BaTiO₃-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives,” *Appl. Phys. Rev.*, vol. 4, no. 4, 2017, doi: 10.1063/1.4990046.