

Review pada Pengaruh Sudut Kemiringan Atap terhadap Keluaran Energi Piezoelektrik pada Eksperimen Konversi Energi dari Tetesan Air Hujan menjadi Energi Listrik

Pandu Kusuma Pangestu, Rifky, Muhammad Fahmi Nurhidayat, Kurnia Sandi Oktaris, Reyhan Martin
Firnanda, & M. Rafi Cahya 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 : pandukp24@gmail.com

Abstrak

Review ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi sudut kemiringan atap terhadap besar keluaran energi piezoelektrik yang dihasilkan dari benturan air hujan buatan. Review ini dilakukan menggunakan model atap miniatur dengan empat variasi sudut kemiringan, yaitu 15°, 30°, dan 45°. Sensor piezoelektrik ditempatkan di bagian bawah permukaan atap dengan bahan polikarbonat. Simulasi hujan dilakukan menggunakan alat peraga dengan debit air dan ukuran tetesan yang dikendalikan secara konstan. Tegangan serta arus listrik yang dihasilkan pada tiap variasi sudut di ukur menggunakan multimeter. Setiap percobaan diulang sebanyak tiga kali untuk memastikan validitas dan konsistensi hasil. Data yang diperoleh dianalisis untuk melihat hubungan antara sudut kemiringan dan keluaran listrik, dengan menampilkan grafik tegangan serta arus terhadap sudut kemiringan, dan menghitung efisiensi konversi energinya. Hasil penelitian menunjukkan variasi sudut kemiringan atap berpengaruh terhadap energi piezoelektrik yang dihasilkan dan didapatkan sudut optimum yang mampu menghasilkan tegangan dan arus tertinggi.

Kata Kunci: piezoelektrik, kemiringan atap, konversi energi, air hujan, polikarbonat.

Abstract

This review was conducted to examine the effect of variations in roof slope angles on the amount of piezoelectric energy generated from the impact of artificial rainwater. The study utilized a miniature roof model with four different slope angles: 15°, 30°, and 45°. Piezoelectric sensors were placed on the underside of the roof surface, which was made of polycarbonate material. Rain simulation was performed using a demonstration device with a constant water discharge rate and controlled droplet size. The voltage and electric current produced at each slope variation were measured using a multimeter. Each experiment was repeated three times to ensure the validity and consistency of the results. The collected data were analyzed to determine the relationship between the roof slope angle and the electrical output by presenting voltage and current graphs against the slope angle and calculating the energy conversion efficiency. The results showed that variations in the roof slope angle affected the generated piezoelectric energy, and an optimum angle was identified that produced the highest voltage and current.

Keywords: piezoelectric, roof slope, energy conversion, rainwater, polycarbonate.

1 PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu penggerak utama perekonomian dunia yang keberadaannya sangat penting. Saat ini, kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring bertambahnya jumlah penduduk dan pesatnya perkembangan teknologi informasi [1]. Berbagai upaya pengembangan telah dilakukan, khususnya pada teknologi pemanen energi, yang bertujuan memanfaatkan energi terbuang di lingkungan sekitar menjadi energi listrik dengan biaya yang lebih efisien [2]. Salah satu jenis

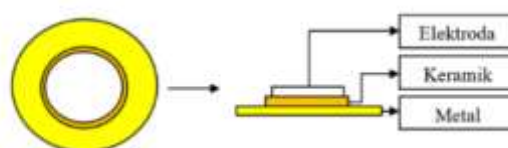
pemanenan energi adalah pemanen energi mekanik, yaitu proses yang mengubah getaran, gerakan, atau tekanan menjadi energi listrik dari berbagai sumber seperti tubuh manusia, mesin, kendaraan, angin, dan air [3]. Dalam pemanenan energi mekanik, terdapat material yang dapat digunakan, yaitu material piezoelektrik. Material ini dapat mengalami perubahan signifikan pada konstanta piezoelektrik dan dielektrik ketika mengalami distorsi, sehingga menghasilkan tegangan listrik. Fenomena tersebut dikenal sebagai efek piezoelektrik [4], [5], [6], [7].

Efek piezoelektrik merupakan peristiwa ketika bahan tertentu dapat menghasilkan listrik saat diberi tekanan, dan sebaliknya, bahan tersebut dapat berubah bentuk ketika dialiri medan listrik. Prinsip ini menjadi dasar dalam teknologi *energy harvesting* berbasis piezoelektrik, yaitu sistem yang memanfaatkan getaran atau tekanan dari lingkungan untuk diubah menjadi energi listrik [7], [8]. Material piezoelektrik biasanya dibuat dalam berbagai bentuk, seperti lempeng lentur (*cantilever*), lapisan ganda (*bimorph*), atau diafragma, tergantung pada sumber getaran yang ingin dimanfaatkan. Secara umum, efek piezoelektrik menjadi dasar penting dalam pembuatan perangkat yang dapat menghasilkan energi secara mandiri, seperti sensor tanpa kabel, alat medis portabel, dan sistem energi kecil yang ramah lingkungan [9].

2 PENGANTAR EFEK PIEZOELEKTRIK

Efek piezoelektrik terjadi ketika suatu bahan bisa menghasilkan listrik saat ditekan dan berubah bentuk ketika diberi medan listrik [10]. Teknologi ini banyak dimanfaatkan untuk memanen energi dari getaran atau tekanan di sekitar kita, terutama untuk perangkat berdaya rendah seperti sensor nirkabel dan alat pemantau struktur bangunan atau jembatan [11]. Ada dua jenis sistem piezoelektrik yang umum digunakan, yaitu tipe tekan dan tipe lentur, dengan bentuk *cantilever* dan *bridge* yang dinilai paling efisien [12]. Bahwa sifat piezoelektrik tidak selalu tetap, tetapi bisa berubah tergantung pada frekuensi getaran dan besarnya tekanan yang diterima material [13]. Karena itu mengembangkan model baru yang memperhitungkan kedua faktor tersebut agar desain perangkat pemanen energi bisa lebih akurat dan efisien, terutama untuk penggunaan pada frekuensi rendah seperti di jalan raya atau jembatan [14]. Efek piezoelektrik adalah kemampuan suatu bahan untuk menghasilkan listrik ketika ditekan atau bergetar [15]. Teknologi ini digunakan untuk mengambil energi dari lingkungan, misalnya dari getaran atau tetesan air hujan, lalu mengubahnya menjadi listrik yang bisa dipakai untuk menyalakan perangkat kecil seperti sensor atau alat elektronik berdaya rendah lainnya [16]. Pada umumnya, sistem pemanen energi piezoelektrik berbentuk batang lentur (*cantilever*) yang menghasilkan listrik dari getaran, namun efisiensinya bergantung pada kesesuaian antara frekuensi getaran bahan dan sumbernya [17]. Sistem piezoelektrik yang dipasang pada poros berputar untuk mempelajari bagaimana arah dan posisi

pemasangan memengaruhi daya yang dihasilkan [18]. Beberapa tahun terakhir, tentang pemanen energi piezoelektrik berkembang dengan cepat karena semakin banyak perangkat kecil yang membutuhkan sumber daya rendah, seperti sensor tanpa kabel, alat pemantau lingkungan, dan sistem otomatis. Teknologi ini dianggap sangat menjanjikan karena bisa menghasilkan listrik langsung dari aktivitas atau getaran di sekitar kita tanpa perlu bergantung pada baterai [19]. Cara menggunakan sensor piezoelektrik untuk mengukur ukuran dan energi tetesan hujan dengan lebih mudah dan murah dibandingkan alat yang biasa digunakan [20]. Teknologi ini bekerja dengan memanfaatkan kemampuan bahan piezoelektrik yang bisa menghasilkan sinyal listrik ketika terkena benturan, dalam hal ini dari tetesan air hujan. Dari sinyal listrik tersebut, dapat mengetahui seberapa besar energi dan ukuran setiap tetesan air yang jatuh ke sensor [19]. Menunjukkan bahwa alat ini mampu memberikan data yang akurat dan terus-menerus tentang ukuran serta energi tetesan hujan, yang sangat berguna untuk memahami proses erosi tanah akibat hujan [1]. Karena desainnya sederhana, kuat, dan biayanya rendah, alat ini cocok digunakan di bidang konservasi tanah dan air, bahkan di berbagai kondisi cuaca, tanpa memerlukan perawatan yang rumit [21].



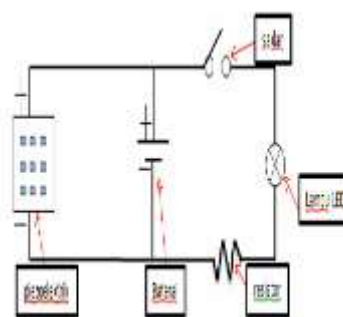
Gambar 1 Struktur Material Piezoelektrik[22].

3 MEKANISME FISIKA EFEK PIEZOELEKTRIK

Efek piezoelektrik adalah kemampuan mekanisme yang terjadi karena saat bahan seperti *Polyvinylidene Fluoride* (PVDF) ditekan, susunan ion di dalamnya bergeser dan menimbulkan perbedaan muatan listrik di permukaan [23]. PVDF digunakan untuk mengubah energi ombak laut menjadi listrik [2]. Ketika ombak menghantam sensor PVDF, gaya dari ombak menyebabkan bahan melengkung dan bergetar sehingga menghasilkan arus listrik [24]. Arus ini kemudian diubah dari arus bolak-balik menjadi arus searah menggunakan penyearah dan diukur dengan bantuan sensor serta sistem Arduino [23]. PVDF dipilih karena fleksibel, ringan, dan tahan terhadap korosi, sehingga cocok digunakan di laut. Semakin

kuat tekanan ombak, semakin besar pula listrik yang dihasilkan, dengan daya rata-rata mencapai sekitar 2,26 mW. Ini membuktikan bahwa efek piezoelektrik dapat dimanfaatkan secara efektif untuk menghasilkan energi listrik ramah lingkungan dari gerakan ombak [25]. Kemampuan suatu bahan untuk menghasilkan listrik ketika ditekan, digetarkan, atau mendapat gaya dari luar, dan sebaliknya bisa berubah bentuk jika dialiri listrik [26]. Mekanisme ini terjadi karena saat bahan seperti piezoelectric disk menerima tekanan dari luar misalnya dari tetesan air hujan susunan atom di dalamnya bergeser dan menimbulkan perbedaan muatan positif dan negatif di permukaannya, sehingga tercipta tegangan listrik [5]. Pembangkit listrik tenaga air hujan dibuat dengan menempatkan lempengan piezoelektrik di atas permukaan akrilik [20]. Ketika hujan turun, setiap tetesan air yang jatuh menekan permukaan tersebut dan menghasilkan listrik [6]. Semakin deras hujan dan semakin kuat tekanan tetesannya, semakin besar pula listrik yang dihasilkan [27]. Arus listrik yang muncul kemudian dikirim ke sensor dan dibaca oleh sistem Arduino untuk ditampilkan di layar [24]. Meskipun daya yang dihasilkan masih kecil, ini membuktikan bahwa efek piezoelektrik bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan energi alternatif yang ramah lingkungan dari sumber alami seperti air hujan [13], [28]. Efek piezoelektrik adalah kemampuan suatu bahan untuk menghasilkan listrik ketika mendapat tekanan, getaran, atau gaya mekanik, dan sebaliknya bisa berubah bentuk saat diberi tegangan listrik [5]. Mekanisme ini terjadi karena ketika bahan piezoelektrik seperti keramik atau kristal ditekan, susunan ion di dalamnya bergeser dan menimbulkan ketidakseimbangan muatan positif dan negatif yang menghasilkan tegangan listrik pada permukaannya [2]. Efek piezoelektrik dimanfaatkan untuk mengubah energi mekanik dari tetesan air hujan menjadi energi listrik [11]. Sensor piezoelektrik dipasang di atas permukaan seng agar setiap tetesan air yang jatuh memberikan tekanan yang menimbulkan getaran dan menghasilkan listrik [22]. Arus yang dihasilkan masih berupa arus bolak-balik (AC), kemudian diubah menjadi arus searah (DC) menggunakan rangkaian pengatur daya sebelum disimpan di baterai dan diolah kembali oleh inverter agar bisa digunakan untuk perangkat listrik kecil [17]. Sistem dengan 20 sensor piezoelektrik berdiameter 35 mm ini mampu menghasilkan tegangan sekitar 0,5 volt saat hujan sedang dan 0,9 volt saat hujan deras [19]. Walaupun daya yang dihasilkan masih kecil dibandingkan panel surya, menunjukkan bahwa efek

piezoelektrik dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif ramah lingkungan yang memanfaatkan tekanan alami dari air hujan [29]. Bahan PVDF dipilih karena fleksibel, ringan, dan mampu menghasilkan listrik dari tekanan kecil [1]. Melalui simulasi menggunakan SolidWorks, ukuran piezoelektrik yang paling efisien dan menemukan bahwa ukuran 1x1 cm dengan ketebalan 0,5 cm memberikan hasil terbaik, dengan nilai *stress* tertinggi mencapai 3,92 N/m² pada tekanan 10 N/m² [19]. Semakin besar tekanan yang diterima bahan, semakin tinggi tegangan yang dihasilkan. Selain itu, PVDF juga memiliki ketahanan panas hingga 175–180°C, sehingga cocok untuk digunakan di lingkungan terbuka [30]. Secara keseluruhan, mekanisme fisika efek piezoelektrik menunjukkan bahwa energi mekanik dari tetesan air hujan dapat diubah menjadi energi listrik melalui perubahan struktur kristal PVDF, menjadikannya sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan cocok diterapkan di daerah dengan curah hujan tinggi seperti Indonesia [31].



Gambar 2 Rangkaian Listrik Piezoelektrik[31].



Gambar 3 Konsep Desain Alat Pemanen Energi Listrik[31].

4 PERSAMAAN DASAR PIEZOELEKTRIK

Persamaan dasar piezoelektrik menjelaskan bahwa saat bahan piezoelektrik seperti PVDF mendapat tekanan atau getaran, susunan muatan di dalamnya bergeser dan menghasilkan listrik [8].

Secara sederhana, semakin besar tekanan yang diterima, semakin besar pula listrik yang dihasilkan. Hubungan ini dijelaskan melalui rumus $D = dT + \epsilon E$, yang menunjukkan bahwa muatan listrik (D) bergantung pada tekanan mekanik (T) dan medan listrik (E) [30]. Tekanan yang lebih kuat menghasilkan tegangan dan daya yang lebih tinggi, membuktikan bahwa efek piezoelektrik bekerja dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi listrik yang bisa digunakan sebagai sumber energi alternatif [32]. Persamaan dasar piezoelektrik menggambarkan hubungan antara tekanan mekanik yang diterima bahan dengan listrik yang dihasilkan [32]. Ketika bahan piezoelektrik ditekan atau bergetar, susunan ion di dalamnya bergeser dan menimbulkan perbedaan muatan pada kedua sisi permukaannya, sehingga muncul tegangan listrik [17]. Secara sederhana, semakin besar tekanan yang diterima, semakin tinggi tegangan yang dihasilkan [32]. Prinsip ini digunakan untuk menganalisis gaya tumbukan air hujan pada membran piezoelektrik, di mana pembagian gaya yang merata dan penyesuaian posisi sensor dapat meningkatkan hasil energi listrik yang dihasilkan dari konversi energi mekanik menjadi energi listrik [33]. Energi dari gelombang air dimanfaatkan untuk menggerakkan kelereng besi yang menumbuk kristal piezoelektrik, lalu menghasilkan listrik. Tegangan yang dihasilkan disearahkan menjadi arus searah (DC) menggunakan rangkaian elektronik dan kemudian disimpan dalam kapasitor. Mekanisme ini membuktikan bahwa efek piezoelektrik dapat mengubah energi gerak dari air menjadi energi listrik yang bisa dimanfaatkan secara efisien [34], [23], [24].

5 JENIS-JENIS MATERIAL PIEZOELEKTRIK

Piezoelektrik adalah material yang bisa menghasilkan listrik saat mendapat tekanan atau getaran [11]. Beberapa jenis bahan yang umum digunakan antara lain PZT (Lead Zirconate Titanate), BaTiO_3 (Barium Titanate), dan PVDF (Polyvinylidene Fluoride) [15]. Setiap bahan memiliki keunggulan berbeda: PZT mampu menghasilkan listrik dengan efisiensi tinggi, sedangkan PVDF lebih fleksibel dan cocok untuk tekanan ringan seperti tetesan air hujan [12]. Material piezoelektrik digunakan bersama panel surya dalam sistem hybrid, di mana tekanan dari air hujan menghasilkan listrik melalui bahan piezoelektrik dan sinar matahari melalui sel surya. Hasilnya

menunjukkan bahwa pemilihan jenis material piezoelektrik sangat berpengaruh terhadap jumlah dan efisiensi energi yang dihasilkan [35]. Material piezoelektrik adalah bahan yang bisa menghasilkan listrik ketika mendapat tekanan atau getaran, dan sebaliknya dapat berubah bentuk saat dialiri listrik [36]. Silikon atau germanium adalah material yang kuat, responsif, dan mampu bekerja terus-menerus dalam kondisi getaran tinggi, sehingga cocok digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik [37]. Setiap bahan memiliki kemampuan berbeda tergantung pada struktur kristal dan kepekaannya terhadap tekanan [38].

6 KARAKTERISTIK DAN PARAMETER KINERJA PIEZOELEKTRIK

Material piezoelektrik PVDF (Polyvinylidene Fluoride) memiliki karakteristik ringan, fleksibel, dan sangat sensitif terhadap tekanan serta getaran, sehingga cocok digunakan untuk sensor dinamis seperti pengukur viskositas cairan. Dibandingkan bahan keramik seperti PZT dan BaTiO_3 yang keras dan mudah rapuh, PVDF lebih tahan terhadap deformasi dan mampu menghasilkan respons listrik yang stabil. Semakin besar ukuran PVDF, semakin tinggi tegangan yang dihasilkan, dengan sensitivitas mencapai 4,6 mV/cPois. Hal ini membuktikan bahwa PVDF memiliki kinerja baik, sensitif, dan efisien dalam mengubah tekanan mekanik menjadi sinyal listrik, menjadikannya material ideal untuk aplikasi sensor dan sistem konversi energi [23], [20]. Piezoelektrik memiliki karakteristik sensitif terhadap getaran dan mampu mengubah tekanan atau benturan menjadi sinyal listrik dengan cepat dan akurat [27]. Efisiensinya ditentukan oleh konstanta piezoelektrik, yaitu seberapa besar tegangan yang dihasilkan dari regangan mekanik [39]. Paving block berbahan limbah plastik yang dirancang agar kuat menahan pijakan kaki atau kendaraan sekaligus mampu menghasilkan listrik. Material ini memiliki sensitivitas tinggi terhadap tekanan, tahan lama, dan ramah lingkungan. Hasilnya menunjukkan bahwa setiap tekanan pada permukaan paving block dapat menghasilkan tegangan listrik, membuktikan bahwa piezoelektrik berpotensi menjadi sumber energi alternatif yang bersih dan berkelanjutan dari aktivitas sehari-hari [40].

7 KONVERSI ENERGI MENGGUNAKAN PIEZOELEKTRIK

Piezoelektrik bekerja dengan mengubah energi mekanik dari getaran turbin menjadi energi listrik. Saat turbin berputar karena aliran udara, getarannya menekan elemen piezoelektrik sehingga menghasilkan muatan listrik pada permukaannya. Listrik yang dihasilkan kemudian disalurkan ke rangkaian penyearah dan penyimpan daya untuk digunakan menyalakan perangkat kecil. Bahwa semakin kuat getaran turbin, semakin besar tegangan listrik yang dihasilkan, sehingga sistem ini dinilai efektif dan ramah lingkungan untuk memanfaatkan energi getaran yang biasanya terbuang [26]. Piezoelektrik dapat mengubah tekanan atau getaran mekanik dari beban menjadi energi listrik. Sistem ini dinilai efisien dan ramah lingkungan karena mampu memanfaatkan energi mekanik yang biasanya terbuang, seperti getaran kendaraan atau pijakan kaki, menjadi sumber listrik alternatif [41]. Piezoelektrik juga digunakan untuk mengubah tekanan mekanik dari pijakan kaki di treadmill menjadi energi listrik. Sistem ini memakai 30 sensor piezoelektrik yang disusun paralel untuk menangkap tekanan dari langkah kaki, lalu mengubahnya menjadi tegangan listrik yang disalurkan agar bisa mengisi baterai. Semakin besar tekanan dan kecepatan berjalan, semakin tinggi tegangan yang dihasilkan, mencapai 24,6 Volt dan 39,2 mA saat berlari dengan berat 82 kg. Energi ini cukup untuk mengisi baterai 6000 mAh dalam waktu sekitar 1 jam 20 menit, membuktikan bahwa piezoelektrik dapat secara efektif mengonversi energi mekanik dari aktivitas manusia menjadi energi listrik ramah lingkungan [42]. Piezoelektrik dapat mengubah energi mekanik dari tetesan air hujan menjadi listrik. Tekanan dari setiap tetesan air menyebabkan bahan piezoelektrik mengalami deformasi dan menghasilkan tegangan listrik. Hal ini membuktikan bahwa piezoelektrik mampu memanen energi dari hujan secara efisien dan berpotensi menjadi sumber energi alternatif yang ramah lingkungan [43], [44].

8 PENERAPAN PIEZOELEKTRIK DALAM TEKNOLOGI

Teknologi piezoelektrik diterapkan pada rantai pemanen energi yang mampu mengubah tekanan pijakan kaki menjadi listrik. Material yang digunakan yaitu keramik dan PVDF, untuk melihat perbandingan kinerjanya. Bahan keramik menghasilkan tegangan lebih besar, sekitar 947,4 mV, sedangkan PVDF hanya sekitar 438,6 mV, namun lebih fleksibel dan tahan terhadap tekanan

berulang. Piezoelektrik dapat dimanfaatkan dalam teknologi rantai cerdas sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan efisien [45]. Teknologi piezoelektrik diterapkan melalui pengembangan material baru yang lebih ramah lingkungan dengan menggabungkan Bismuth Sodium Titanate (BNT) dan Barium Titanate (BaTiO_3) serta menambahkan Tantalum Pentoxide (Ta_2O_5). Kombinasi ini menghasilkan bahan piezoelektrik bebas timbal dengan struktur kristal yang stabil dan cocok untuk aplikasi seperti sensor, aktuator, dan transduser. Bahwa penambahan Ta_2O_5 mampu memperbaiki struktur kristal dan meningkatkan kinerja listrik material, menjadikannya alternatif potensial untuk menggantikan bahan berbasis timbal seperti PZT dalam teknologi piezoelektrik modern [46]. Piezoelektrik diterapkan dalam pengembangan material ramah lingkungan tanpa kandungan timbal, menggunakan campuran Bismuth Sodium Titanate (BNT), Barium Titanate (BT), dan Bismuth Potassium Titanate (BKT). Material ini dibuat dengan metode solid state reaction dan memiliki struktur kristal yang mampu menghasilkan listrik saat diberi tekanan. Dengan konstanta dielektrik tinggi dan suhu Curie sekitar 428°C , bahan ini dinilai cocok untuk digunakan pada teknologi sensor, aktuator, dan sistem pemanen energi sebagai alternatif pengganti material berbasis timbal [47]. Teknologi piezoelektrik diterapkan pada alat pembangkit listrik yang memanfaatkan tekanan dari pijakan kaki manusia. Sistem ini menggunakan 35 sensor PZT yang disusun paralel untuk mengubah energi mekanik menjadi listrik, lalu disalurkan dan disimpan dalam kapasitor untuk menyalakan lampu LED. Bahwa semakin besar tekanan atau berat pijakan, semakin tinggi tegangan yang dihasilkan, yaitu mencapai 6,08 VDC tanpa beban dan 2,23 VDC dengan beban [43]. Piezoelektrik dapat dimanfaatkan sebagai teknologi ramah lingkungan untuk menghasilkan listrik dari aktivitas manusia sehari-hari [48].

9 KATA PENUTUP

Review jurnal ini disusun dengan tujuan untuk menambah wawasan dan pemahaman mengenai teknologi piezoelektrik, khususnya dalam kaitannya dengan pengembangan dan pemanfaatan energi alternatif. Melalui pembahasan yang terdapat dalam review jurnal ini, diharapkan pembaca dapat memahami prinsip dasar serta aplikasi nyata dari efek piezoelektrik dalam berbagai bidang.

Piezoelektrik merupakan salah satu inovasi penting dalam upaya penghematan dan pemanfaatan energi terbarukan. Sifat bahan piezoelektrik yang mampu mengubah tekanan mekanik menjadi energi listrik memberikan potensi besar untuk dikembangkan sebagai sumber energi ramah lingkungan. Teknologi ini dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, seperti sensor, perangkat medis, sistem transportasi, hingga pembangkit energi skala kecil.

Dengan memahami konsep dan penerapan piezoelektrik, diharapkan pembaca dapat melihat peluang pengembangan teknologi ini di masa depan. Selain efisien, penggunaan energi dari efek piezoelektrik juga dapat membantu mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil yang semakin menipis dan tidak ramah lingkungan.

Review ini juga memberikan gambaran bahwa penguasaan teknologi piezoelektrik tidak hanya penting bagi dunia akademik, tetapi juga bagi sektor industri yang ingin mengoptimalkan efisiensi energi. Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan lebih lanjut terhadap material piezoelektrik perlu terus dilakukan untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal.

Sebagai penutup, penulis berharap bahwa review jurnal ini dapat menjadi referensi bermanfaat bagi para pembaca yang ingin memperdalam pengetahuan tentang teknologi piezoelektrik dan kontribusinya terhadap penghematan energi. Semoga tulisan ini dapat menumbuhkan minat untuk terus menggali inovasi dalam bidang energi terbarukan demi keberlanjutan kehidupan di masa depan.

KEPUSTAKAAN

- [1] W. C. Widodo, Windarta, R. D. Nur'aini, and F. Maghfurah, "Pengaruh Variasi Curah Hujan dan Sudut Kemiringan terhadap Daya Keluaran pada Alat Uji Piezoelektrik," in *Prosiding Seminar Nasional LPPM UMJ*, Jakarta: LPPM UMJ, 2024, pp. 1–7. [Online]. Available: <http://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnaslit>
- [2] D. Pratama, I. Qiram, and A. Mukhtar, "Pengaruh Sudut Kemiringan Dan Jenis Material Atap Terhadap Tegangan Listrik Yang Dihasilkan Piezoelektrik," *V-MAC (Virtual Mech. Eng. Artic.*, vol. 6, no. 2, pp. 71–74, 2021, doi: 10.36526/v-mac.v6i2.1521.
- [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] M. A. Caro, S. Schulz, and E. P. O'Reilly, "Origin of nonlinear piezoelectricity in III-V semiconductors: Internal strain and bond ionicity from hybrid-functional density functional theory," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 91, no. 7, pp. 1–10, 2015, doi: 10.1103/PhysRevB.91.075203.
- [5] J. S. Yang and R. C. Batra, "Second order theory for piezoelectric materials," *Am. Soc. Mech. Eng. Des. Eng. Div.*, vol. 79, no. May, pp. 89–99, 1994, doi: 10.1121/1.412312.
- [6] N. A. Hill and U. Waghmare, "First-principles study of strain-electronic interplay in ZnO: Stress and temperature dependence of the piezoelectric constants," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 62, no. 13, pp. 8802–8810, 2000, doi: 10.1103/PhysRevB.62.8802.
- [7] D. G. Wakshume and M. Ł. Płaczek, "Optimizing Piezoelectric Energy Harvesting from Mechanical Vibration for Electrical Efficiency: A Comprehensive Review," *Electron.*, vol. 13, no. 5, 2024, doi: 10.3390/electronics13050987.
- [8] C. H. Wong, Z. Dahari, A. Abd Manaf, and M. A. Miskam, "Harvesting raindrop energy with piezoelectrics: A review," *J. Electron. Mater.*, vol. 44, no. 1, pp. 13–21, 2015, doi: 10.1007/s11664-014-3443-4.
- [9] J. R. Andrade, "Piezoelectric Energy Harvesting: A Comprehensive Review and Applications," pp. 1–12, 2022.
- [10] I. Palomba, A. Doria, M. Bottin, and G. Rosati, "applied sciences Vibration Energy Harvesting from Raindrops Impacts : Experimental Tests and Interpretative Models," 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/app12073249>.
- [11] J. Ghazanfarian, M. M. Mohammadi, and K. Uchino, "Piezoelectric Energy Harvesting : A Systematic Review of Reviews," pp. 1–40, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/act10120312>.
- [12] V. Wong, J. Ho, and A. B. Chai, "Piezoelectric energy harvesting in varying simulated rain conditions PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING IN VARYING SIMULATED," no. January, 2016.
- [13] D. Zebua, D. Kolago, Y. A. C. Wijaya, and Y. A. K. Utama, "Desain dan Pembuatan Pembangkit Listrik Tenaga Air Hujan

- Menggunakan Piezoelectric Disk,” *J. Tecnoscienza*, vol. 4, no. 1, pp. 1–16, 2019.
- [14] E. Bernat-Maso and L. E. Mercedes, “Piezoelectric elements subjected to low frequency excitation. Empirical determination of stress and frequency influence on piezoelectric parameters,” *Microsyst. Technol.*, vol. 28, no. 8, pp. 1897–1910, 2022, doi: 10.1007/s00542-022-05331-7. K. Kunci, “DIREGANGKAN,” 2017.
- [15] K. Kunci, “DIREGANGKAN,” 2017.
- [16] A. Doria, G. Fanti, G. Filipi, and F. Moro, “Development of a novel piezoelectric harvester excited by raindrops,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 17, 2019, doi: 10.3390/s19173653.
- [17] R. D. I. Leo, M. Viscardi, F. P. Tuccinardi, and M. Visone, “NUMERICAL MODELLING OF A PIEZO ROOF HARVESTING SYSTEM: THE RIGHT COMPONENT SELECTION,” vol. LXIV, 2017, doi: 10.1515/meceng-2017-0016.
- [18] W. Su, J. Lin, and W. Li, “Analysis of a Cantilevered Piezoelectric Energy Harvester in Different Orientations for Rotational Motion”.
- [19] R. Miceli, P. Romano, C. Spataro, and F. Viola, “Performances of rainfall energy harvester,” *20th IMEKO TC4 Symp. Meas. Electr. Quant. Res. Electr. Electron. Meas. Econ. Upturn, Together with 18th TC4 Int. Work. ADC DCA Model. Testing, IWADC 2014*, pp. 467–472, 2014.
- [20] A. Hendriawan and D. C. Happyanto, “Piezoelectric Sebagai Alternatif Catu Daya Tambahan pada Mobil Listrik,” *Inovtek*, vol. 4, no. 1, p. 27, 2014.
- [21] A. W. Jayawardena and R. B. Rezaur, “Measuring drop size distribution and kinetic energy of rainfall using a force transducer,” *Hydrol. Process.*, vol. 14, no. 1, pp. 37–49, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(200001)14:1<37::AID-HYP908>3.0.CO;2-M.
- [22] K. Sarjana, T. Politeknik, M. Negeri, and B. Belitung, “Pembangkit listrik menggunakan piezoelektrik dengan memanfaatkan tekanan dari pijakan kaki manusia pada lantai,” 2025.
- [23] H. F. S. S. D. R. Julius, “APPLICATION OF PIEZOELECTRIC MATERIAL FILM PVDF (Polyvinylidene Flouride) AS LIQUID VISCOSITY SENSOR,” *J. Neutrino*, vol. 3, no. 2, pp. 129–142, 2012, doi: 10.18860/neu.v0i0.1648.
- [24] Syawaluddin, E. Diniardi, A. I. Ramadhan, D. Almanda, and E. Dermawan, “Analisis Desain Optimum Model Hybrid Solar Cell-Piezoelectric Dengan Cad Program,” *Semin. Nas. Sains dan Teknol. 2017*, no. November, pp. 1–7, 2017.
- [25] Aditya and Azhis, “G-Tech : Jurnal Teknologi Terapan,” *Investig. Kemamp. Pembangkit List. Tenaga Ombak Laut Mikro Berbas. PVDF*, vol. 6, no. 2, pp. 1–8, 2022, doi: <https://doi.org/10.33379/gtech.v6i2.1757>.
- [26] D. Y. P. Talantan, “Desain Dan Implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Getar Turbin,” 2024.
- [27] N. Anggraini, “Prototipe Sistem Notifikasi Kecelakaan dan Wiper Otomatis pada Helm dengan Mikrokontroler Arduino,” *J. Ilm. FIFO*, vol. 12, no. 2, p. 213, 2021, doi: 10.22441/fifo.2020.v12i2.010.
- [28] I. Khair, S. Sasmono, and C. Ekaputri, “Analisa Tegangan Dan Arus Pada Sistem Konversi Energi Suara Menjadi Listrik Menggunakan Komponen Piezoelektrik (Voltage and Current Analysis on Sound To Electricity Conversion System Using Piezoelectric Components),” vol. 8, no. 5, pp. 4250–4258, 2021.
- [29] M. H. Alfatiha, “Perancangan Dan Implementasi Alat Pembangkit Listrik Hybrid Menuggunakan Tenaga Surya Dan Piezoelectric (P-Supir),” *Aisyah J. Informatics Electr. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 219–230, 2024, doi: 10.30604/jti.v6i2.271.
- [30] 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.
- [31] 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>
- [32] D. Almanda, E. Dermawan, E. Diniardi, Syawaluddin, and A. I. Ramadhan, “Pengujian Desain Model Piezoelektrik PvdF Berdasarkan Variasi Tekanan,” *Semin. Nas. Sains dan Teknol. 2016*, no. November 2016, pp. 1–6,

- 2016, [Online]. Available: <https://media.neliti.com/media/publications/172417-ID-pengujian-desain-model-piezoelektrik-pvd.pdf>
- [33] E. Diniardi, S. Syawaluddin, A. I. Ramadhan, W. Isnaini, E. Dermawan, and D. Almanda, "Analisis Desain Pickup Piezoelektrik Dari Model Hybrid Solar Cell-Piezoelectric Untuk Daya Rendah," *J. Teknol.*, vol. 9, no. 2, p. 83, 2017, doi: 10.24853/jurtek.9.2.83-88.
- [34] M. Eko Saputro, M. Ilyas Hadikusuma, J. dan Teknologi Rekayasa Sistrm Elektronika, P. Negeri PontianakJI Jend Ahmad Yani, and B. Laut, "ENTRIES (Journal of Electrical Network Systems and Sources) Jurusan Teknik Elektro-Politeknik Negeri Ketapang Generator Listrik Tenaga Gelombang Air Menggunakan Kristal Piezoelektrik," vol. 04, no. 01, pp. 1–4, 2025, doi: 10.58466/entries.
- [35] E. Diniardi, S. Syawaludin, A. I. Ramadhan, N. H. Fithriyah, and E. Dermawan, "Piezoelectric Power Analysis of Low-Scale Hybrid Solar Cell piezoelectric Model," *J. Teknol. Univ. Muhammadiyah Jakarta*, vol. 10, no. 2, pp. 139–146, 2018.
- [36] E. Yulia, E. Permana Putra, E. Ekawati, and N. Nugraha, "Polisi Tidur Piezoelektrik Sebagai Pembangkit Listrik dengan Memanfaatkan Energi Mekanik Kendaraan Bermotor," *J. Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 8, no. 1, p. 105, 2016, doi: 10.5614/joki.2016.8.1.9.
- [37] A. Kiswantono, A. Irwan, P. S. Elektro, F. Teknik, and U. B. Surabaya, "Inovasi Energi Hijau : Piezoelektrik Untuk Mengubah," vol. 12, no. 3, pp. 1829–1835, 2024, doi: <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i3.4452>.
- [38] T. Dewangga, "Studi Eksperimental Performa Sound Energy Harvesting Device Menggunakan Variasi Rangkaian Piezoelektrik," *Creat. Res. Eng.*, vol. 3, no. 1, p. 24, 2023, doi: 10.30595/cerie.v3i1.14314.
- [39] Comisión Económica para América Latina y el Caribe *et al.*, *No Title НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОБНАРУЖЕНИЮ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЖЕНЬШЕНЯ МЕТОДОМ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ЖИДКОСТНОЙ ХРОМАТО-МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ*, vol. 17, no. 2. 2016.
- [40] F. S. Jati, "Mlaku: Penerapan Teknologi Waste To Energy (Wte) Sampah Plastik Menjadi Piezoelectric Paving Block Melalui Sustainable Community," *Kumpul. Esai Mhs. tentang Sikap Gener. Z terhadap Konserv. Lingkung.*, 2024.
- [41] D. R. Putra *et al.*, "Energi Alternatif Melalui Getaran Beban Mekanis," *Pros. Semin. Nas. Teknoka*, vol. 3, no. 2502, p. 8, 2018, doi: 10.22236/teknoka.v3i0.2802.
- [42] M. R. Kurniawan and Umar, "Pemanfaatan Treadmill Manual Sebagai Penghasil Listrik Dengan Menggunakan Sensor Piezoelektrik," pp. 1–23, 2016.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] S. Rahayu, "SINTESIS BAHAN PIEZOELEKTRIK BNT-BT DENGAN PENAMBAHAN TA 2 O 5 MENGGUNAKAN METODE SOLID STATE REACTION," vol. 2, no. 4, pp. 276–283, 2013.
- [47] T. Bnt-bt-bkt, A. C. Iby, A. Mahyudin, and S. Ahda, "Telah dilakukan studi awal proses pemolangan dan karakterisasi sifat listrik terhadap bahan piezoelektrik ramah lingkungan BNT-BT-BKT. Dalam penelitian ini, sintesis bahan dilakukan dengan metode," vol. 3, pp. 2–6.
- [48] E. Stiawan and A. J. Taufiq, "Rancang Bangun Alat Pemanen Energi Listrik Dari Tekanan Mekanik Berbasis Piezoelektrik," *J. Ris. Rekayasa Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 79–84, 2020, doi: 10.30595/jrre.v2i2.8280.