

Review Pengaruh Jenis Material Atap terhadap Efisiensi Pemanenan Energi dengan Piezoelektrik sebagai Konverter Energi Mekanik menjadi Energi Listrik

Muhammad Fahmi Nurhidayat, Rifky, Kurnia Sandi Oktaris, Pandu Kusuma Pangestu, Reyhan Martin
Firnanda, M. Ravi 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 : mhmmdfmn26@gmail.com

Abstrak

Rintik hujan yang mengenai material atap dan jatuhnya air hujan memberikan tekanan pada atap dapat dimanfaatkan sebagai sumber listrik dengan piezoelektrik sebagai konverter, energi mekanik menjadi energi listrik. Tujuan penelitian ini untuk mendapatkan material atap yang menghasilkan daya listrik dan efisiensi yang maksimal pada pemanenan energi air hujan yang jatuh. Metode penelitian ini dilakukan dengan membandingkan tiga jenis material atap dan piezoelektrik, sehingga menghasilkan listrik dalam bentuk tegangan dan arus yang diukur dengan multimeter. Data hasil pengukuran diolah menjadi daya listrik dan efisiensi. Hasil penelitian mendapatkan bahwa jenis material atap berpengaruh terhadap kinerja piezoelektrik sebagai konverter energi.

Kata Kunci: material atap, pemanenan energi, piezoelektrik, konverter, efisiensi

Abstract

Raindrops hitting the roof material and the falling rainwater exerting pressure on the roof can be utilized as a power source with piezoelectrics as a converter of mechanical energy into electrical energy. The purpose of this research is to find the right roof material to produce maximum electrical power and efficiency in harvesting the energy of falling rainwater. This research method is carried out by comparing three types of roof materials placed on top of the piezoelectric. The falling rainwater will press the roof material and piezoelectric, thus producing electricity in the form of voltage and current measured with a multimeter. The measurement data is processed into electrical power and efficiency. The results of the study found that the type of roof material affects the performance of the piezoelectric as an energy converter.

Keywords: roofing materials, energy, harvesting, piezoelectric, converter, efficiency

1. PENDAHULUAN

Energi menjadi kebutuhan penting bagi aktivitas kehidupan manusia, salah satunya adalah energi listrik yang digunakan pada setiap waktu dan menjadikan fosil sebagai sumber daya utama dalam pembangkit listrik [1]. Banyak dampak negatif yang ditimbulkan dalam pemanfaatan bahan bakar fosil, salah satunya sebagai faktor penyebab berbagai masalah lingkungan, seperti polusi udara dan pemanasan global yang berdampak pada kesehatan manusia dan kualitas hidup manusia. Selain itu, jumlah penduduk yang meningkat serta standar hidup manusia dapat

menyebabkan peningkatan permintaan energi dan emisi Co₂. Penggunaan bahan bakar fosil telah menimbulkan dampak untuk menggunakan energi alternatif dan terbarukan yang lebih ramah lingkungan [2]. Dari kenyataan saat ini, sumber energi alternatif dibutuhkan tetapi energi yang memiliki potensi tersebut seringkali diabaikan. Banyak penelitian telah dilakukan untuk menghasilkan energi terbarukan dari alam langsung dan bahan baru, salah satu bahan baru adalah Piezoelektrik [3]. **Gambar 1** menunjukkan bentuk bahan keramik sensor piezoelektrik.

Teknologi yang paling menjanjikan untuk menyediakan solusi untuk kekurangan bahan bakar fosil, berbagai masalah lingkungan dan peningkatan efisiensi energi dalam jaringan pintar adalah pemanfaatan energi, yang menghasilkan energi berguna dari sumber energi yang terbuang [4]. Sejauh ini, energi dapat dihasilkan dengan berbagai cara, seperti tenaga angin, air, surya, tenaga termal, dll. Material piezoelektrik merupakan generator penghasil daya. Piezoelektrik memiliki profil rendah, skala mikro, hingga meso, dan desain struktur yang fleksibel, sehingga cocok untuk aplikasi kecil. Penghasil energi biasanya memiliki Tingkat daya nW , μW , mW atau W , untuk menghasilkan listrik dari sumber energi terbarukan [5].

Potensi ini telah ditunjukkan dalam berbagai aplikasi, termasuk pemanenan energi dari getaran hingga pembuatan perangkat yang dapat digunakan [6]. Teknologi Pemanfaatan energi piezoelektrik melalui getaran dan bahkan air memiliki potensi yang luar biasa untuk pemanenan energi listrik [7]. Bahan piezoelektrik adalah bahan yang dapat menghasilkan tegangan listrik ketika mengalami gaya tekanan. Gaya tekanan ini dapat disebabkan oleh tekanan secara langsung pada bahan atau dihasilkan dalam bentuk getaran yang dijalarakan pada bahan piezoelektrik [8]. Bahan piezoelektrik terbagi menjadi dua bagian yaitu, bahan alami dan bahan buatan [9]. Kondisi operasi pada bahan piezoelektrik seperti ukuran dan ketinggian jatuh berpengaruh terhadap kinerja bahan piezoelektrik. Efek tetesan hujan pada pemanen menghasilkan jumlah listrik yang kecil dan tidak merata [10].

Efek piezoelektrik berasal dari muatan listrik yang terkumpul pada bahan padat tertentu [11]. Sensor piezoelektrik dapat mengumpulkan energi listrik dari rintik hujan. Pada penelitian ini sebuah sensor piezoelektrik ditempatkan pada atap. Hujan akan mengenai sensor piezoelektrik di atap rumah dan menghasilkan getaran. Hujan akan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Karena atap tidak memiliki hambatan yang mencegah air hujan jatuh, penempatan sensor piezoelektrik di dalamnya akan lebih efektif untuk mengumpulkan energi dari air hujan [12]. Intensitas hujan mempengaruhi jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh piezoelektrik. Namun, masih sedikit penelitian yang secara khusus membahas jenis material atap terhadap efisiensi konversi energi mekanik menjadi energi listrik [13].



Gambar 1 Keramik sensor piezoelektrik

2. PENGANTAR PIEZOELEKTRIK

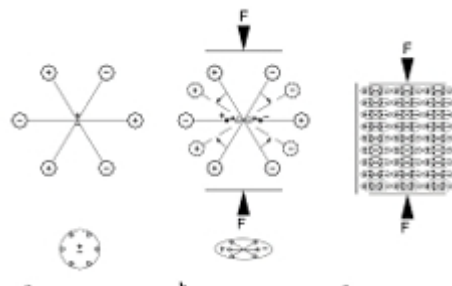
Saudara Curie, Pierre dan Jacques Curie, menemukan piezoelektrik pertama kali pada tahun 1880 saat melakukan penelitian pada kristal kuarsa, turmalin, dan garam Rochelle. Efek piezoelektrik langsung terjadi ketika material piezoelektrik kristal kuarsa terkena tekanan mekanis. Karena akar bahasa Yunani dari kata "piezo" berarti "tekanan", definisi awal dari piezoelektrisitas adalah "listrik tekanan"[14][15][16][17].

Efek piezoelektrik langsung menghasilkan energi dari getaran atau tekanan karena material piezoelektrik dapat menghasilkan listrik. Efek piezoelektrik terbalik terjadi ketika material piezoelektrik dipengaruhi oleh medan listrik. Dalam banyak kasus, material piezoelektrik hanya bertindak pada satu orientasi. Dalam kesejajarannya, sumbu Z yang juga dikenal sebagai sumbu poling, berfungsi sebagai acuan arah polarisasi [18].

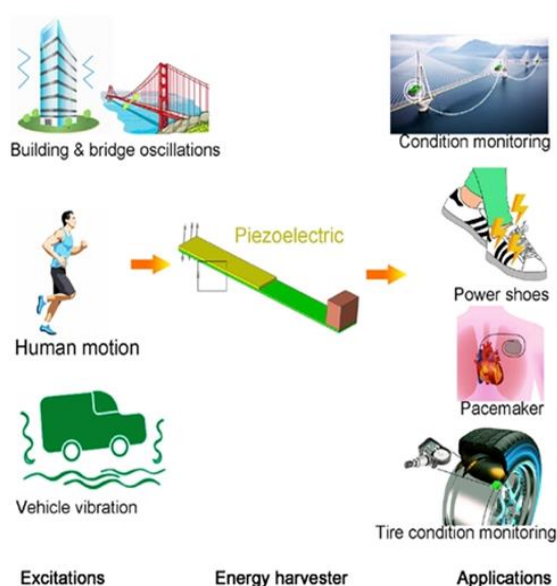
Dengan memanfaatkan getaran dari lingkungan, seperti struktur bangunan yang bergetar, teknik pemanenan energi piezoelektrik dapat diterapkan[19]. Dalam situasi nyata, penggunaan piezoelektrik untuk memanen energi adalah ide yang layak dan menguntungkan. Penggunaan metode untuk menghasilkan energi elektro-mekanis dari energi terbuang[20]. Dalam sepuluh tahun terakhir, banyak penelitian telah berusaha untuk menghasilkan piezoelektrisitas. Desain umum yang digunakan adalah struktur balok dan pelat yang dikombinasikan dengan komponen piezoelektrik secara sederhana [21]. Pemanenan energi dengan memanfaatkan sumber daya alam disajikan dan dibahas di bawah ini.

Pemanfaatan tetesan hujan sebagai sumber energi dilakukan ketika air hujan yang jatuh ke permukaan atap menghasilkan getaran. Getaran tersebut diteruskan ke struktur piezoelektrik untuk kemudian dikonversi menjadi energi listrik. Pada saat struktur elastis yang dilapisi material piezoelektrik mengalami deformasi akibat hantaman tetesan hujan, energi kinetik dari air hujan berubah menjadi energi listrik melalui mekanisme piezoelektrik [22]. tetesan hujan berdiameter 1 mm menghasilkan 1 nJ energi listrik dan 1 μW daya instan, sedangkan tetesan hujan berdiameter 5 mm menghasilkan 25 μJ energi listrik dan 12 mW [23]. .

menyebabkan dipol dan pemisahan pusat gravitasi positif dan negatif dari molekul [24].



Gambar 3 Model molekul sederhana untuk menjelaskan efek piezoelektrik: a. molekul yang tidak terganggu, b. molekul mengalami gaya eksternal, dan c. efek polarisasi pada permukaan material [24].

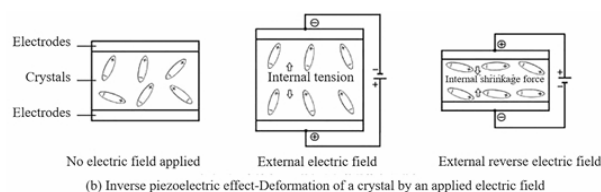


Gambar 2 Proses pengumpulan energi dari lingkungan dengan alat piezoelektrik [21].

3. MEKANISME FISIKA EFEK PIEZOELEKTRIK

Material mengalami perubahan dan dimensi sebagai akibat dari efek piezoelektrik. Molekul yang terpolarisasi akan menyesuaikan dengan medan listrik ketika melewati material, dan menghasilkan dipole yang terinduksi dengan molekul atau struktur kristal. Efek eksternal muatan negatif dan positif dibatalkan secara timbal balik. Dengan demikian, molekul elektrik netral muncul. Tekanan dapat mempengaruhi struktur internal bahan, yang

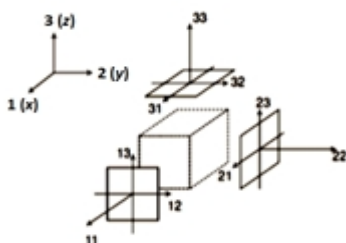
Ketika medan listrik bolak-balik diterapkan pada kristal, mengakibatkan deformasi mekanis dan getaran kristal, ini disebut efek piezoelektrik terbalik. Ketika frekuensi tegangan bolak-balik diterapkan sama dengan frekuensi alami kristal, biasanya bergantung pada ukuran kristal, amplitudo getaran mekanis meningkat, dalam fenomena yang disebut “resonansi piezoelektrik”, material piezoelektrik memiliki kemampuan untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik dengan memanfaatkan efek piezoelektrik positif. Akibatnya, mereka dapat mengumpulkan energi getaran dari lingkungan. Getaran mekanis kemudian dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik [25].



Gambar 3.1 Efek piezoelektrik terbalik-deformasi kristal oleh medan listrik yang diberikan [25].

4. PERSAMAAN PIEZOELEKTRIK

Standar internasional IEEE digunakan untuk membuat formula atau hubungan matematis yang menjelaskan bagaimana bahan piezoelektrik bertindak dalam kondisi linier. Standar ini menjelaskan bagaimana medan listrik dan tegangan mekanik berinteraksi dengan material piezoelektrik. Sumbu z adalah sumbu polarisasi yang dibuat dari bahan yang menghasilkan atau menerima tegangan listrik. Karena keramik piezoelektrik telah melalui proses polarisasi, sifatnya simetris di sepanjang arah utama, yaitu arah isotropik transversal. Semua sifat fisik dan simetris pada sumbu z, kecuali ketika dilihat ke arah z dan tegak lurus terhadap bidang xy. Kubus piezoelektrik menunjukkan arah sumbu x, y, z. Gambar 3 kubus piezoelektrik menunjukkan arah bidang dan sumbu [26].



Gambar 4 Arah sumbu kubus piezoelektrik [26].

Struktur Kristal material piezoelektrik biasanya tidak memiliki simetri pusat pada kandungan kisi Kristal. Efek piezoelektrik langsung terjadi ketika tekanan eksternal mempengaruhi pusat muatan positif dan negatif pada kedua ujung permukaan, menyebabkan perpindahan dan menghasilkan tegangan listrik. Selama gaya eksternal tetap dalam batas tertentu, muatan dari material piezoelektrik sebanding dengan gaya eksternal. Dengan demikian dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$\delta = dT \quad (1)$$

δ adalah densitas permukaan, d adalah konstanta regangan piezoelektrik, T adalah tegangan tarik. Sebaliknya, efek piezoelektrik terbalik terjadi ketika medan listrik diterapkan pada material piezoelektrik daripada tekanan yang diberikan padanya. Ini

menyebabkan perpindahan distribusi pusat muatan positif dan negatif. Polarisasi terjadi, yang mengakibatkan regangan pada bahan. Ketika besar medan listrik berada dalam kisaran tertentu, besar tegangan dan sinyal listrik keluaran memiliki hubungan linear satu sama lain :

$$x = dE \quad (2)$$

x adalah regangan, E didefinisikan sebagai medan listrik dan d ditetapkan sebagai konstanta regangan piezoelektrik terbalik. Seberapa kuat hubungan antara sifat elastisitas dan sifat dielektrik dalam bahan piezoelektrik ditunjukkan oleh energi, diukur dengan koefisien kopling elektromekanis, yang dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$K = \sqrt{\frac{u_{12}^2}{u_1 u_2}} \quad (3)$$

u_{12} didefinisikan sebagai energi piezoelektrik, u_1 ditetapkan sebagai energi elastisitas, dan u_2 didefinisikan sebagai energi dielektrik [27].

Langkah pertama dalam mempelajari bagaimana bahan piezoelektrik bertindak ketika dikenai medan listrik atau gaya mekanik. Hal ini dilakukan dengan menggunakan teori respon medan umum dan pendekatan termodinamika linear. Keadaan kesetimbangan material piezoelektrik dijelaskan oleh tiga variabel termodinamika intensif, T adalah suhu, X adalah tensor tegangan dan E adalah vektor medan listrik, dan 3 variabel ekstensif, S adalah entropi, x adalah tensor regangan, D adalah vektor perpindahan dielektrik. Menurut hukum termodinamika pertama, ketika struktur kristal diberi gaya mekanik atau medan listrik, perubahan energi dapat diperbaiki tanpa kehilangan energi, dU , diberikan oleh

$$dU = \partial Q + \partial W \quad (4)$$

Hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa ketika kristal menyerap panas adalah $\delta Q = TdS$, entropinya meningkat dan suhunya sebanding dengan kristal tersebut. Usaha, δW , yang dilakukan pada kristal terdiri dari kontribusi dielektrik dan gaya mekanik.

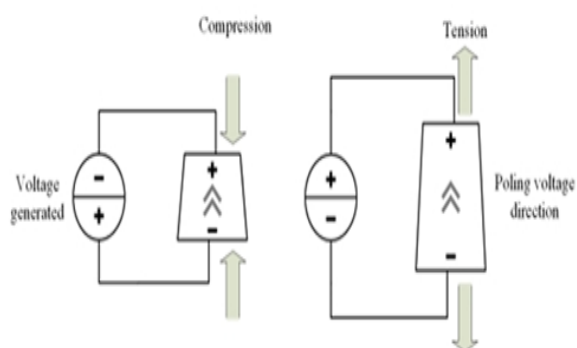
$$\partial W = Xdx + EdD$$

(5) simetris menjadi sebuah kekurangan bagi sifat piezoelektrik [30].

Dan bentuk diferensial dari energi internal menjadi

$$dU(S, X, D) = TdS + X_{ij}dx_{ij} + E_idD_i \quad (6)$$

Arah tiga dimensi (sumbu x, y, dan z) ditunjukkan oleh rentang indeks huruf $i, j = 1, 2, \text{ dan } 3$. Karena tiga variabel independen dapat dipilih dari pasangan variabel konjugat dengan delapan cara berbeda, terdapat tujuh fungsi termodinamika, masing-masing yang dapat digunakan sebagai persamaan keadaan untuk menjelaskan perilaku material. Persamaan energi yang dikontrol langsung dengan variabel independennya biasanya lebih mudah dikombinasikan dan diukur. Persamaan energi untuk variabel independen suhu, tegangan, dan medan listrik dihasilkan ketika fungsi tambahan entalpi digunakan, $H = U + W$, dan bentuk diferensial energi bebas, $G = H - TS$ [28].



Gambar 4 Proses Tegangan yang dihasilkan oleh elemen piezoelektrik akibat tekanan dan tarikan melalui efek piezoelektrik langsung [26].

5. SIMPULAN

Bahan piezoelektrik sangat penting untuk pemanenan energi karena mereka akan mengalami regangan, regangan yang lebih besar menghasilkan lebih banyak energi mekanik yang dapat dikonversi menjadi energi listrik [29]. Struktur kristal non-simetris-sentris pada piezoelektrik berarti pusat muatan positif dan negatif tidak bertepatan. Struktur

Berbagai bahan piezoelektrik digunakan, masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan yang berbeda:

1. **Bahan Kristalin Alami** : Bahan piezoelektrik kristalin, seperti garam Rochelle dan kuarsa, memiliki karakteristik unik. Kuarsa yang dihargai karena kekakuannya, daya tahan, dan ketahanan terhadap suhu tinggi, tidak optimal untuk eksitasi frekuensi tinggi dan kontrol struktural [31]. Garam Rochelle, yang dibuat secara sintesis, terkenal karena sensitivitas kimianya dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan [32].
2. **Bahan Keramik Sintetis** : barium titanat dan PZT adalah dua material piezokeramik yang menonjol, PZT terkenal karena kekuatannya, sensitivitasnya, dan koefisien kopling elektromekanis yang tinggi, yang membuatnya ideal untuk pemantauan Kesehatan struktural dan pemanenan energi. Barium titanat juga digunakan dalam berbagai elemen elektronik dan dapat ramah lingkungan ketika digunakan dalam varian bebas timbal [33].
3. **Polimer Piezoelektrik** : Polyvinylidene fluoride memiliki sifat yang fleksibel. PVDF disukai untuk berbagai aplikasi yang melibatkan berbagai bentuk dan ukuran, serta bermanfaat dalam berbagai industri, seperti dirgantara. PVDF memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan bahan piezoelektrik keramik, termasuk harga yang lebih rendah dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang keras [34].

Tabel 1 Menunjukkan keuntungan dan kerugian dari beberapa bahan yang umum digunakan [34].

Material	Keuntungan	Kerugian
Kristal Kuarsa	Resistivitas listrik yang sangat baik, Q mekanik ultra-tinggi, stabilitas suhu tinggi, kekakuan tinggi, keamanan daya	Koefisien piezoelektrik rendah, kemungkinan tidak bekerja pada eksitasi frekuensi tinggi, tidak dapat digunakan dalam

	<i>tahan, dan umur panjang.</i>	<i>deteksi kerusakan dan control structural.</i>
<i>Rochelle Salt</i>	<i>Efek piezoelektrik kuat, tidak terpengaruh oleh kondisi lingkungan yang merugikan.</i>	<i>Higroskopis, perilaku sangat bergantung pada suhu, sensitivitas tinggi terhadap bahan kimia.</i>
<i>PZT</i>	<i>Kopling tinggi elektromekanis rentang frekuensi dan produksi, kehilangan listrik rendah, suhu currie tinggi, polarisasi spontan</i>	<i>Kepadatan tinggi, kurang stabil secara mekanis, dampak negatif terhadap lingkungan.</i>
<i>PVDF</i>	<i>Fleksibilitas tinggi, tahan terhadap suhu dan korosi kimia, impedansi akustik rendah, jangkauan frekuensi lebih tinggi daripada PZT, lebih sesuai untuk aplikasi dengan bentuk yang besar dan kompleks.</i>	<i>Koefisien piezoelektrik rendah, suhu Curie rendah, sulit dalam peregangan dan polarisasi material</i>

6. PENERAPAN PIEZOELEKTRIK DALAM TEKNOLOGI

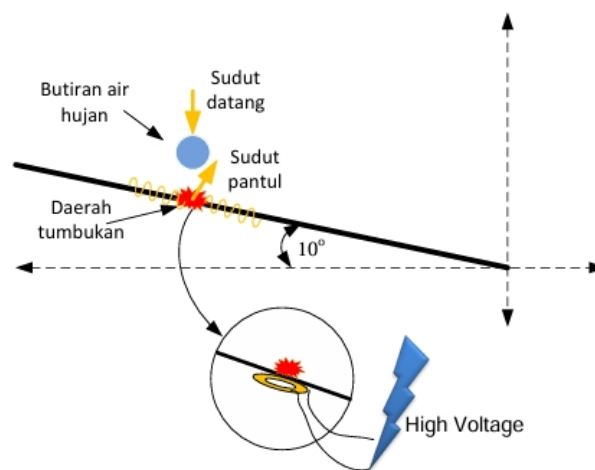
Piezoelektrik adalah bahan yang menghasilkan energi listrik dari tetesan air hujan yang bersentuhan langsung dan menimbulkan tekanan. Aktivitas curah hujan dapat mempengaruhi energi listrik yang dihasilkan oleh sirkuit piezoelektrik, semakin signifikan curah hujan, semakin tinggi tekanan, dan semakin besar energi listrik yang dihasilkan. Sebaliknya, energi listrik akan rendah jika aktifitas curah hujan sedikit. Dengan metode yang disesuaikan, piezoelektrik dapat menghasilkan energi listrik dengan menggunakan tekanan hujan rata-rata [35].

Atap adalah struktur bangunan yang melindungi bagian dalam bangunan dari panas matahari, hujan, dan salju sehingga aman bagi orang yang tinggal di sana [36]. Untuk mengambil energi kinetik dari tetesan hujan beberapa modul ditempatkan dibawah

material atap yang bergetar karena pengaruh tetesan hujan untuk menghasilkan energi listrik [37]. Selain itu, Perbedaan sifat material atap sangat berpengaruh. Semakin tinggi intensitas curah hujan pada permukaan atap dapat mengakibatkan kenaikan kekuatan tumbukan sehingga sehingga efeknya semakin besar untuk mempengaruhi keluaran daya tegangan listrik yang dihasilkan oleh modul piezoelektrik [38].

Hasil dari sebuah penelitian eksperimental telah menunjukkan bahwa variasi sudut kemiringan dan jenis material atap (plastik gelombang dan galvalum) berdampak pada produksi getaran dan tegangan listrik. Sudut kemiringan 10° pada jenis material atap dengan curah hujan tinggi menghasilkan getaran dan tegangan listrik tertinggi yaitu, 16,42 mm/s dengan tegangan listrik 0,4322 volt pada atap galvalume. Sedangkan, atap plastik gelombang menghasilkan getaran 16,26 mm/s dan tegangan 0,3602 volt.

Perbedaan sudut kontak antara tetesan hujan dan material atap menjadi sebuah pengaruh terhadap getaran dan keluaran daya tegangan piezoelektrik yang dihasilkan [36]. **Gambar 5** menunjukkan proses pemanenan energi dari tetesan air hujan yang mengenai material atap dan menimbulkan getaran yang menyebabkan piezoelektrik bereaksi.



Gambar 5 Ilustrasi output tegangan pada sudut kemiringan 10° [36].

7 PENUTUP

Review jurnal ini membahas gambaran mendalam tentang kemungkinan teknologi piezoelektrik sebagai solusi energi terbarukan masa

depan. Sebagian besar pemanenan energi piezoelektrik berfokus pada pemanfaatan energi getaran di lingkungan. Perubahan struktur kristal akibat gaya eksternal dan polarisasi yang dimanfaatkan menjadi energi listrik. Persamaan dasar piezoelektrik meningkatkan pemahaman teoritis setelah penjelasan tentang mekanisme fisik piezoelektrik. Persamaan ini membantu menganalisis bagaimana material bertindak terhadap tekanan dan tegangan.

Selain itu, penjelasan tentang berbagai jenis material piezoelektrik menunjukkan bahwa pemilihan material piezoelektrik sangat penting untuk efisiensi, fleksibilitas penerapan, dan kinerja konversi energi. Piezoelektrik telah digunakan secara luas dalam teknologi, termasuk pemanenan energi dari tetesan air hujan dengan menggunakan struktur bangunan seperti atap sebagai media transmisi gaya mekanik ke piezoelektrik. Tegangan dan getaran yang dihasilkan oleh atap plastic gelombang dan galvalum dipengaruhi oleh sudut kemiringan dan curah hujan. Plastik gelombang menghasilkan tegangan 0,4322 volt dengan getaran 16,42 mm/s dan galvalume 0,3602 volt dengan getaran 16,26 mm/s.

KEPUSTAKAAN

- [1] D. Rahmawati, M. Ulum, M. Farisal, and K. Joni, "Lantai Pembangkit Listrik Menggunakan Piezoelektrik dengan Buck Converter LM2596," *J. Arus Elektro Indones.*, vol. 7, no. 3, p. 84, 2021, doi: 10.19184/jaei.v7i3.28128.
- [2] A. W. Azhar, M. H. Al-Fikri, R. I. Sulasmono, N. Sholikhah, N. A. Wafiyah, and C. P. Dewi, "Elektroof: Smart roof as an energy independent solution for Indonesia in the future," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 847, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/847/1/012033.
- [3] B. Margoleno and P. Negeri Bengkalis, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Getar Dengan Memanfaatkan Piezoelektrik," *Semin. Nas. Ind. dan Teknol.*, pp. 107–122, 2018.
- [4] M. G. Kang, W. S. Jung, C. Y. Kang, and S. J. Yoon, "Recent progress on PZT based piezoelectric energy harvesting technologies," *Actuators*, vol. 5, no. 1, 2016, doi: 10.3390/act5010005.
- [5] T. Li and P. S. Lee, "Piezoelectric Energy Harvesting Technology: From Materials, Structures, to Applications," *Small Struct.*, vol. 3, no. 3, 2022, doi: 10.1002/sstr.202100128.
- [6] 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.
- [7] J. R. Andrade, "Piezoelectric Energy Harvesting: A Comprehensive Review and Applications," pp. 1–12, 2022.
- [8] W. Hidayatullah, M. Syukri, and Syukriyadin, "Perancangan Prototype Penghasil Energi Listrik Berbahan Dasar Piezoelektrik," *KITEKTRO J. Online Tek. Elektro*, vol. 1, no. 3, pp. 63–67, 2016.
- [9] Abdul Fajar Kallawa, Agus Fikri, and Mohammad Mujirudin, "Pengaruh Rangkaian Seri Dan Paralel Terhadap Tegangan Pada Piezoelektrik," *Met. J. Manufaktur, Energi, Mater. Tek.*, vol. 1, no. 2, pp. 52–57, 2023, doi: 10.22236/metalik.v1i2.11041.
- [10] 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.
- [11] A. Bouhamed *et al.*, "A Comprehensive Review of Strategies toward Efficient Flexible Piezoelectric Polymer Composites Based on BaTiO₃ for Next-Generation Energy Harvesting," *Energies*, vol. 17, no. 16, 2024, doi: 10.3390/en17164066.
- [12] N. H. bin A. R. Norkharziana Mohd Nayan, Mohd Fahmi A. Razak, Azuwa Ali, Siti Khodijah Mazalan, Ami Nurul Nazifah Abdullah, "Development of Rain Harvester using Piezoelectric Sensor Jurnal Teknologi," *J. Teknol.*, no. August, pp. 1–6, 2015.
- [13] G. Acciari *et al.*, "Piezoelectric Rainfall Energy Harvester Performance by an Advanced Arduino-Based Measuring System," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 1, pp. 458–468, 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2752132.
- [14] K. Uchino, *The Development of Piezoelectric Materials and the New Perspective*, 2nd ed. Elsevier Ltd., 2017. doi: 10.1016/b978-0-08-102135-4.00001-1.
- [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] S. Das Mahapatra *et al.*, “Piezoelectric Materials for Energy Harvesting and Sensing Applications: Roadmap for Future Smart Materials,” *Adv. Sci.*, vol. 8, no. 17, 2021, doi: 10.1002/advs.202100864.
- [17] E. Listijorini *et al.*, “Rancang Bangun ALPENLIBE (Alat Pemanen Energi Listrik Berbasis Piezoelektrik) Sebagai Upaya Mewujudkan Energi Terbarukan,” *J. Rekayasa Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 7, no. 1, pp. 1–7, 2024, [Online]. Available: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>
- [18] 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.
- [19] X. D. Xie and Q. Wang, “Design of a piezoelectric harvester fixed under the roof of a high-rise building,” *Eng. Struct.*, vol. 117, pp. 1–9, 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.03.018.
- [20] F. Viola, “Comparison among different rainfall energy harvesting structures,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 6, 2018, doi: 10.3390/app8060955.
- [21] N. Wu, B. Bao, and Q. Wang, “Review on engineering structural designs for efficient piezoelectric energy harvesting to obtain high power output,” *Eng. Struct.*, vol. 235, no. March, p. 112068, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112068.
- [22] B. Bao and Q. Wang, “Small-scale experimental study on the optimisation of a rooftop rainwater energy harvester using electromagnetic generators in light rains,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 13, pp. 10778–10796, 2020, doi: 10.1002/er.5726.
- [23] R. Guigon, J. J. Chaillout, T. Jager, and G. Despesse, “Harvesting raindrop energy: Experimental study,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, no. 1, 2008, doi: 10.1088/0964-1726/17/01/015039.
- [24] 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.
- [25] Y. Wu, Y. Ma, H. Zheng, and S. Ramakrishna, “Piezoelectric materials for flexible and wearable electronics: A review,” *Mater. Des.*, vol. 211, p. 110164, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110164.
- [26] W. V. Kean and B. E. Hons, “DEVELOPMENT OF A DYNAMIC MODEL FOR RAINDROP ENERGY by Declaration of Authorship,” 2017.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] R. Di Leo, M. Viscardi, F. P. Tuccinardi, and M. Visone, “Numerical Modelling of a Piezo Roof Harvesting System: The Right Component Selection,” *Arch. Mech. Eng.*, vol. 64, no. 2, pp. 257–282, 2017, doi: 10.1515/meceng-2017-0016.
- [30] A. M. Eltamaly and K. E. Addoweesh, “Transactions on Power Electronics A Novel Self Power SSHI Circuit for Piezoelectric Energy Harvester,” vol. 8993, no. c, 2016, doi: 10.1109/TPEL.2016.2636903.
- [31] S. Guerin, S. A. M. Tofail, and D. Thompson, “Organic piezoelectric materials : milestones and potential,” *NPG Asia Mater.*, vol. 12, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1038/s41427-019-0110-5.
- [32] S. Zhang, F. Li, F. Yu, and X. Jiang, “Review Recent Developments in Piezoelectric Crystals,” vol. 55, no. 5, pp. 419–439, 2018.
- [33] D. Vatansever, R. L. Hadimani, T. Shah, and E. Siores, “An investigation of energy harvesting from renewable sources with PVDF and PZT,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 5, 2011, doi: 10.1088/0964-1726/20/5/055019.
- [34] 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.
- [35] A. Susanti, D. P. Sari, M. A. Nauzy, S. Widaningsih, Y. Hamdiyanti, and K. Novianingsih, “Rainwater Pressure Electric Generator Model Using Piezoelectric,” *Indones. J. Multidisciplinary Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 11–16, 2021, doi: 10.17509/ijomr.v1i1.33666.
- [36] D. Pratama, I. Qiram, and A. Mukhtar, “Pengaruh Sudut Kemiringan Dan Jenis Material Atap Terhadap Tegangan Listrik

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

Yang Dihasilkan Piezoelektrik,” *V-MAC*
(*Virtual Mech. Eng. Artic.*, vol. 6, no. 2, pp.
71–74, 2021, doi: 10.36526/v-
mac.v6i2.1521.

- [37] Y. R. Wang, W. T. Lin, and B. J. Huang, “Rain-Induced Vibration Energy Harvesting Using Nonlinear Plates with Piezoelectric Integration and Power Management,” *Sensors*, vol. 25, no. 14, 2025, doi: 10.3390/s25144347.
- [38] M. A. Ilyas and J. Swingler, “Piezoelectric energy harvesting from raindrop impacts,” *Energy*, vol. 90, pp. 796–806, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.07.114.