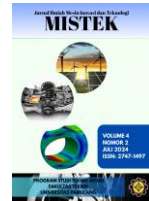




JURNAL TEKNIK MESIN MISTEK MESIN INOVASI DAN TEKNOLOGI



UNJUK KERJA PROTOTIPE *TURBINE BLADES* PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN SISTEM *FLOATING* DI INDONESIA

Muh. Tegar Kelana¹, Joko Setiyono²

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No.1, Tangerang Selatan, Indonesia

E-mail : dosen00889@unpam.ac.id²

Masuk : 15 Februari 2024

Direvisi : 20 Maret 2024

Disetujui : 10 April 2024

Abstrak: Pertumbuhan penduduk yang terus meningkat mendorong kenaikan kebutuhan energi, sehingga pemanfaatan energi terbarukan menjadi semakin penting. Di Indonesia, pengembangan energi angin masih sangat terbatas dan hanya sedikit penelitian yang berhasil mengonversinya menjadi energi listrik. Turbin angin berbasis vortisitas muncul sebagai inovasi baru dengan perkembangan signifikan, menawarkan konsep berbeda dari turbin konvensional melalui pemanfaatan getaran sebagai sumber energi yang kemudian diubah menjadi listrik oleh sistem generator. Mekanisme elektromagnetik dalam sistem ini dihasilkan dari pergerakan magnet yang berosilasi akibat pegas progresif di dalam lilitan kawat, sementara generator berperan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik arus searah melalui komutator yang umum digunakan sebagai penguat dalam aplikasi industri. Penelitian ini menggunakan metode studi literatur untuk memperoleh dasar teori, informasi, dan data relevan terkait topik penelitian. Hasil kajian menunjukkan bahwa daya keluaran terbesar (*Pout*) diperoleh pada kecepatan angin 8 m/s dengan diameter piezoelektrik 50 mm, sedangkan daya terendah terjadi pada kecepatan 3 m/s dengan diameter 35 mm; sementara itu, efisiensi tertinggi (η_G) muncul pada kecepatan angin 3 m/s dengan diameter piezoelektrik 50 mm, dan efisiensi terendah ditemukan pada kecepatan 8 m/s dengan diameter 35 mm.

Kata Kunci: Vortisitas, Elektromagnetik, Piezoelektrik.

Abstract: The continuous growth of the population has led to an increased demand for energy, making the development of renewable sources increasingly essential. In Indonesia, the utilization of wind energy remains limited, with only a few studies successfully converting it into electrical power. Vorticity-based wind turbines have emerged as a rapidly advancing innovation, introducing a concept distinct from conventional turbines by harnessing vibrations as an energy source, which are then converted into electricity through a generator system. The electromagnetic mechanism is generated by the oscillating motion of a magnet driven by a progressive spring within a wire coil, while the generator functions to convert mechanical energy into direct current (DC) electricity via a commutator commonly used as a booster in industrial applications. This study employs a literature review approach to provide theoretical grounding and gather relevant information and data related to the research topic. The findings indicate that the highest output power (*Pout*) is achieved at a wind speed of 8 m/s with a piezoelectric diameter of 50 mm, whereas the lowest output occurs at 3 m/s with a diameter of 35 mm. Meanwhile, the highest efficiency (η_G) is obtained at a wind speed of 3 m/s with a 50 mm piezoelectric diameter, and the lowest efficiency is found at 8 m/s with a 35 mm diameter.

Keywords: Vorticity, Electromagnetic, Piezoelectric.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk yang terus meningkat menyebabkan kebutuhan energi turut melonjak, sehingga mendorong perlunya pengembangan sumber energi alternatif yang dapat menggantikan ketergantungan pada energi fosil. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial adalah energi angin, yang mampu dikonversi menjadi energi listrik melalui teknologi turbin angin [1]. Di Indonesia, pemanfaatan energi angin masih relatif rendah dan penelitian terkait konversi energi tersebut masih terbatas. Padahal, energi angin menawarkan sistem yang sederhana, mudah dalam perawatan, tidak memerlukan keterampilan khusus, serta tersedia secara melimpah di berbagai wilayah. Selain itu, turbin angin memiliki biaya pembuatan dan operasional yang cukup terjangkau sehingga layak untuk dijadikan investasi energi jangka panjang [2], [3].

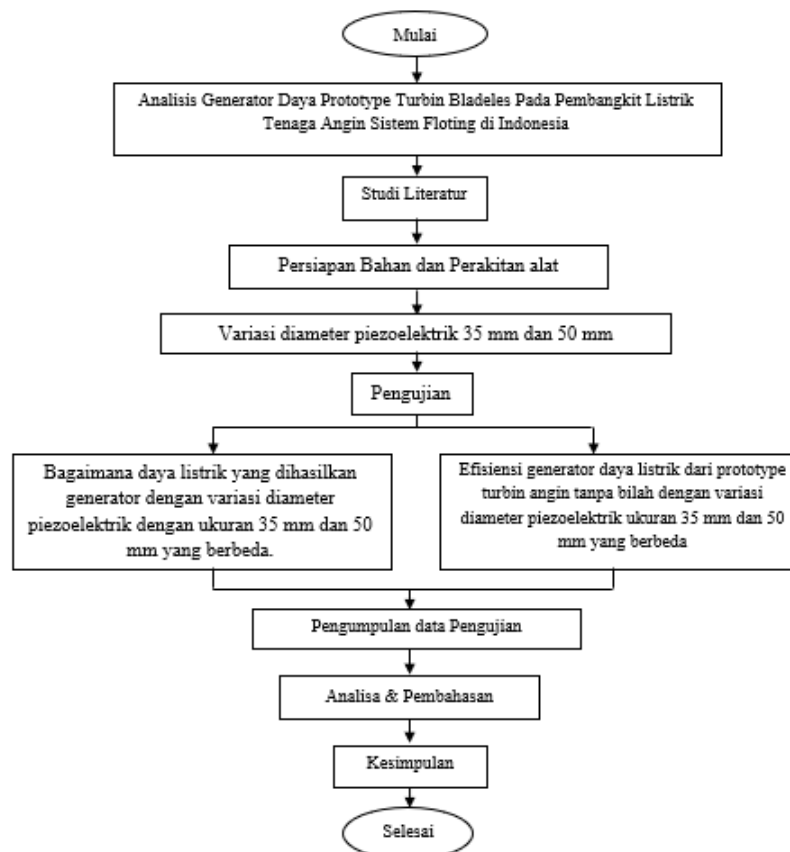
Salah satu inovasi yang berkembang pesat dalam teknologi energi angin adalah turbin angin berbasis vortisitas, yang menghadirkan konsep baru dengan menghilangkan bilah turbin. Sistem ini menggunakan struktur silinder fleksibel yang ditempatkan di lingkungan terbuka sehingga aliran udara dengan kecepatan tertentu dapat memicu getaran. Getaran tersebut kemudian dikonversi menjadi energi listrik melalui rangkaian generator. Keunggulan utama dari teknologi ini adalah kemampuannya menghasilkan getaran signifikan pada kecepatan angin rendah, kondisi yang umumnya tidak dapat dicapai oleh turbin angin konvensional [4]. Mekanisme elektromagnetik di dalam sistem ini bekerja melalui osilasi magnet yang digerakkan oleh pegas progresif dalam lilitan kawat. Perubahan kekakuan pegas secara dinamis menyesuaikan dengan variasi kecepatan angin, sehingga frekuensi kerja turbin dapat selalu selaras dengan frekuensi getaran yang diinduksi oleh fenomena vortisitas. Representasi massa terkumpul dan formulasi celah jarak digunakan untuk mengembangkan persamaan kopel nonlinier yang menggambarkan gerak turbin yang dapat disesuaikan [5].

Secara umum, generator berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, baik dalam bentuk arus bolak-balik (AC) maupun arus searah (DC). Energi mekanik tersebut dapat bersumber dari panas, uap, atau aliran air. Prinsip kerja generator mengacu pada Hukum Faraday, yang menyatakan bahwa perubahan medan magnet terhadap sebuah penghantar akan menghasilkan gaya gerak listrik (GGL). Pada generator DC, keberadaan komutator memungkinkan penguatan arus pada sistem generator utama di bengkel maupun industri, sedangkan pembalikan arah arus setiap setengah putaran menghasilkan arus AC pada generator bolak-balik [6].

Berdasarkan pemaparan tersebut, pengembangan energi terbarukan perlu mendapat perhatian serius di Indonesia sebagai upaya mengurangi ketergantungan pada energi fosil yang ketersediaannya semakin menurun. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja generator turbin angin tanpa bilah dengan berbagai variasi diameter kawat kumparan, serta menentukan besaran daya yang dihasilkan dan efisiensi generator pada setiap variasi tersebut.

METODOLOGI

Tahapan penelitian ini disusun berdasarkan diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 1. Diagram tersebut menggambarkan urutan langkah penelitian mulai dari studi literatur, persiapan alat dan bahan, variasi diameter piezoelektrik, hingga pengujian, analisis, dan penarikan kesimpulan.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Studi Literatur

Studi literatur dilakukan sebagai tahap awal untuk memperoleh landasan teori yang kuat dalam memahami konsep *vortex bladeless turbine*, karakteristik piezoelektrik, prinsip kerja *generator*, dan pembangkitan listrik berbasis energi angin. Proses ini melibatkan penelusuran sumber-sumber kredibel seperti buku, *journal articles*, skripsi, tesis, publikasi ilmiah, dan laporan penelitian.

Melalui studi literatur, peneliti mendapatkan gambaran perkembangan teknologi, variabel yang memengaruhi kinerja generator, serta metode analisis yang sesuai. Tahap ini juga penting untuk mengidentifikasi celah penelitian dan memperkuat argumentasi ilmiah yang digunakan dalam pembahasan hasil penelitian.

Persiapan Alat dan Perakitan Alat

Pada tahap ini dilakukan persiapan seluruh peralatan dan bahan yang diperlukan. Karena penelitian banyak melibatkan desain dan simulasi, perangkat *laptop* digunakan untuk membuat perancangan generator dan struktur turbin menggunakan perangkat lunak *AutoCAD 2017*. Selain itu, disiapkan juga alat tulis seperti pensil dan pulpen untuk membuat sketsa kasar dan mencatat temuan atau koreksi selama proses penelitian.

Tabel 1. Alat yang Digunakan dalam Penelitian

No	Alat yang Digunakan	Fungsi dan Kegunaan
1	Multimeter	Alat ukur arus dan tegangan
2	Anemometer	Alat ukur kecepatan angin
3	Solder	Alat untuk menyambung komponen

Selain alat, penelitian ini juga memerlukan beberapa bahan pendukung yang digunakan untuk menyusun generator dan sistem turbin angin tanpa bilah.

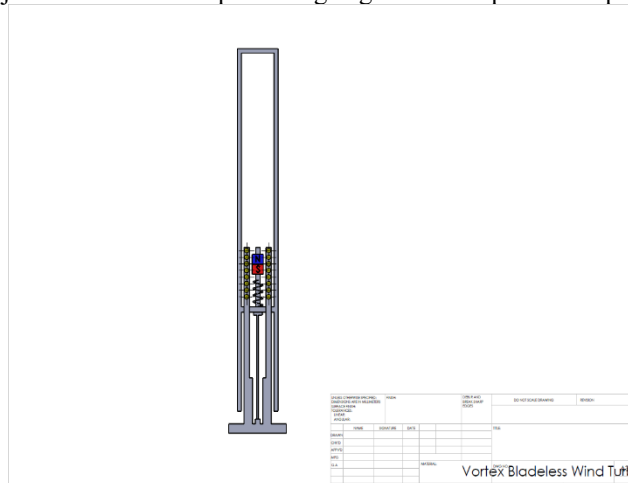
Tabel 2. Bahan yang Digunakan dalam Penelitian

No	Nama Part	Deskripsi Barang	QTY
1	<i>Piezoelectric</i>	Ø 35 mm & Ø 50 mm	18
2	<i>Rectifier</i>	Ø 4 mm & Ø 5 m	1
3	Kabel	Panjang 2 meter	1
4	Pegas	Ø 25 mm	1
5	Baterai/Aki	12 Volt 65 Ah	1
6	<i>Inverter</i>	1000 Watt	1

Semua alat dan bahan tersebut dirakit mengikuti rancangan generator yang telah dibuat, sehingga sistem dapat bekerja optimal ketika terkena hembusan angin dan menghasilkan getaran yang dikonversi menjadi energi listrik.

Desain Generator

Desain generator turbin dilakukan menggunakan perangkat lunak *AutoCAD* untuk memvisualisasikan konstruksi *vortex bladeless turbine* yang menjadi objek penelitian. Desain ini mencakup struktur tabung fleksibel, posisi pegas, konfigurasi piezoelektrik, serta letak lilitan kawat dan magnet sebagai komponen utama dalam proses konversi energi getaran menjadi listrik. Gambar perancangan generator dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Desain Generator Daya Turbin *Vortex*

Variasi Diameter Piezoelektrik

Tahap berikutnya adalah menentukan variasi diameter piezoelektrik yang digunakan dalam generator, yaitu Ø 35 mm dan Ø 50 mm. Variasi ini ditujukan untuk mengidentifikasi pengaruh diameter sensor terhadap besar daya (*output power*) dan efisiensi *generator*. Setiap piezoelektrik dipasang secara bergantian pada sistem untuk mengetahui respons listrik yang dihasilkan terhadap perubahan diameter.

Pengujian

Pengujian dilakukan untuk memperoleh data tegangan, arus, dan daya listrik yang dihasilkan oleh generator *vortex bladeless turbine* dengan dua variasi diameter piezoelektrik. Pengujian dilakukan pada aliran udara dengan kecepatan tertentu menggunakan *anemometer*. Fokus pengujian meliputi Daya listrik yang dihasilkan dari variasi diameter 35 mm dan 50 mm dan Efisiensi generator dari kedua variasi diameter tersebut. Data pengujian akan menjadi dasar analisis performa sistem turbin tanpa bilah.

Efisiensi Generator

Perhitungan efisiensi dilakukan berdasarkan tiga jenis daya dalam *direct current (DC) generator*, yaitu daya masukan (*input power*), daya jangkar (*armature power*), dan daya keluaran (*output power*). Daya keluaran dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{out} = I \times V \quad (1)$$

Dengan:

I = arus listrik (Ampere)

V = tegangan (Volt)

Kemudian daya masukan dari energi angin dihitung dengan rumus:

$$P_{in} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

Dengan:

ρ = massa jenis udara (1,225 kg/m³)

A = luas sapuan turbin (m²)

v = kecepatan angin (m/s)

Sementara itu, efisiensi generator dihitung berdasarkan persamaan:

$$\eta_G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

P_{out} = daya keluaran (Watt)

P_{in} = daya masukan (Watt)

Pengumpulan Data

Semua hasil pengujian, termasuk tegangan, arus, dan daya, dikumpulkan dan disajikan dalam tabel untuk memudahkan proses analisis. Pengumpulan data dilakukan secara sistematis agar perubahan nilai akibat variasi diameter piezoelektrik dapat diamati dengan jelas.

Analisis dan Pembahasan

Data yang telah diperoleh dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi diameter piezoelektrik terhadap performa generator. Analisis dilakukan dengan membandingkan tegangan, arus, daya keluaran, serta efisiensi pada setiap variasi. Tahap pembahasan akan menjelaskan hubungan antara teori konversi energi, karakteristik piezoelektrik, dan hasil pengujian secara empiris.

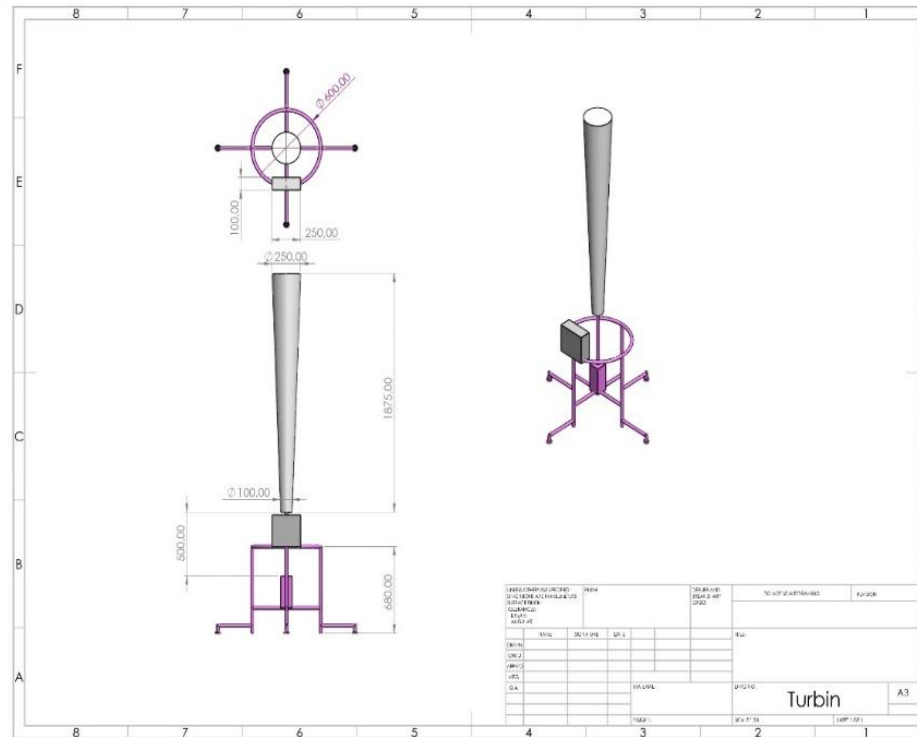
Kesimpulan

Tahap terakhir adalah penyusunan kesimpulan berdasarkan seluruh tahapan penelitian. Kesimpulan merangkum kinerja generator turbin angin tanpa bilah, sejauh mana variasi diameter piezoelektrik memengaruhi daya dan efisiensi, serta implikasinya bagi pengembangan energi terbarukan berbasis angin.

Desain Vortex Bladeless Turbine

Gambar 3 menunjukkan rancangan lengkap dari *vortex bladeless turbine* yang digunakan dalam penelitian. Desain ini menampilkan konfigurasi struktural turbin tanpa bilah, termasuk tabung fleksibel, pegas, posisi piezoelektrik, serta susunan magnet dan lilitan kawat yang berfungsi dalam proses konversi energi getaran menjadi

energi listrik. Model ini dibuat menggunakan perangkat lunak *AutoCAD* untuk memastikan ketepatan dimensi dan kesesuaian mekanisme kerja dengan prinsip vortisitas. Desain tersebut kemudian menjadi dasar dalam perakitan turbin dan proses pengujian performa generator.



Gambar 3. Desain *Vortex Bladeless Turbine*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Daya Keluaran Generator pada Variasi Diameter Piezoelektrik

Perhitungan daya keluaran (*output power*) dilakukan menggunakan Persamaan 1. Nilai arus dan tegangan diperoleh melalui pengukuran menggunakan *multimeter*, sedangkan kecepatan angin (*v*) diukur menggunakan *anemometer*. Pengukuran dilakukan untuk dua variasi diameter piezoelektrik, yaitu 35 mm dan 50 mm, pada tiga kondisi kecepatan angin: 3 m/s, 5 m/s, dan 8 m/s.

1. Diameter Piezoelektrik 35 mm pada Kecepatan Angin 3 m/s (v_1)

Tabel 3. Rata-rata Tegangan dan Arus Keluaran $v = 3$ m/s, \varnothing 35 mm

Pengukuran	Waktu	Arus (A)	Tegangan (V)
1	08:00	2,3	1,12
2	08:15	2,5	1,14
3	08:30	2,2	1,16
4	08:45	2,1	1,18
5	09:00	2,7	1,2
6	09:15	2,6	1,22
7	09:30	2,8	1,24
8	09:45	2,4	1,26
9	10:00	2,9	1,28
10	10:15	2,3	1,3
11	10:30	2,1	1,32
12	10:45	2,8	1,34
Rata-rata		2,475	1,23

Sehingga daya keluaran adalah:

$$P_{out} = 2,475 \times 1,23 = 3,044 \text{ watt}$$

2. Diameter Piezoelektrik 35 mm pada Kecepatan Angin 5 m/s (v_2)

Tabel 4. Rata-rata Tegangan dan Arus Keluaran $v = 5$ m/s, Ø 35 mm

Pengukuran	Waktu	Arus (A)	Tegangan (V)
1	10:00	2,5	1,3
2	10:15	2,3	1,34
3	10:30	2,6	1,38
4	10:45	2,8	1,42
5	11:00	2,7	1,46
6	11:15	2,9	1,5
7	11:30	3	1,54
8	11:45	2	1,58
9	12:00	2,6	1,62
10	12:15	2,7	1,66
11	12:30	2,8	1,7
12	12:45	2,8	1,74
Rata-rata		2,642	1,52

Sehingga daya keluaran adalah:

$$P_{out} = 2,642 \times 1,52 = 4,015 \text{ watt}$$

3. Diameter Piezoelektrik 35 mm pada Kecepatan Angin 8 m/s (v_3)

Tabel 5. Rata-rata Tegangan dan Arus Keluaran $v = 8$ m/s, Ø 35 mm

Pengukuran	Waktu	Arus (A)	Tegangan (V)
1	13:00	2,7	1,74
2	13:15	2,6	1,78
3	13:30	2,5	1,82
4	13:45	2,4	1,86
5	14:00	2,9	1,9
6	14:15	2,8	1,94
7	14:30	2,7	1,98
8	14:45	2,7	2,12
9	15:00	3	2,16
10	15:15	2,9	2,2
11	15:30	2,8	2,24
12	15:45	2,7	2,28
Rata-rata		2,725	2,002

Sehingga daya keluaran adalah:

$$P_{out} = 2,725 \times 2,002 = 5,455 \text{ watt}$$

4. Diameter Piezoelektrik 50 mm pada Kecepatan Angin 3 m/s (v_1)

Tabel 6. Rata-rata Tegangan dan Arus Keluaran $v = 3$ m/s, Ø 50 mm

Pengukuran	Waktu	Arus (A)	Tegangan (V)
1	17:00	2,9	1,45
2	17:15	2,5	1,48
3	17:30	2,7	1,51
4	17:45	2,6	1,54
5	18:00	2,9	1,57
6	18:15	2,8	1,6
7	18:30	2,6	1,63
8	18:45	2,7	1,66
9	19:00	2,9	1,69
10	19:15	2,7	1,72
11	19:30	2,6	1,75
12	19:45	2,6	1,78
Rata-rata		2,708	1,615

Sehingga daya keluaran adalah:

$$P_{out} = 2,708 \times 1,165 = 4,374 \text{ watt}$$

5. Diameter Piezoelektrik 50 mm pada Kecepatan Angin 5 m/s (v_2)

Tabel 7. Rata-rata Tegangan dan Arus Keluaran $v = 5$ m/s, Ø 50 mm

Pengukuran	Waktu	Arus (A)	Tegangan (V)
1	20:00	2,9	1,8
2	20:15	3	1,83
3	20:30	2,8	1,86
4	20:45	3,1	1,89
5	21:00	3,2	1,92
6	21:15	2,8	1,95
7	21:30	2,9	1,98
8	21:45	2,6	2,23
9	22:00	3,2	2,24
10	22:15	3	2,25
11	22:30	3,2	2,26
12	22:45	3,4	2,27
Rata-rata		3,008	2,04

Sehingga daya keluaran adalah:

$$P_{out} = 3,008 \times 2,04 = 6,137 \text{ watt}$$

6. Diameter Piezoelektrik 50 mm pada Kecepatan Angin 8 m/s (v_3)

Tabel 8. Rata-rata Tegangan dan Arus Keluaran $v = 8$ m/s, Ø 50 mm

Pengukuran	Waktu	Arus (A)	Tegangan (V)
1	23:00	2,9	2,3
2	23:15	3,2	2,35
3	23:30	3,4	2,4
4	23:45	3,8	2,45
5	00:00	3,6	2,5
6	00:15	3,5	2,55
7	00:30	3,7	2,6
8	00:45	3,9	2,65
9	01:00	3,6	2,7
10	01:15	3,8	2,75
11	01:30	3,7	2,8
12	01:45	3,6	2,85
Rata-rata		3,558	2,575

Sehingga daya keluaran adalah:

$$P_{out} = 3,558 \times 2,575 = 9,162 \text{ watt}$$

Hasil perhitungan daya keluaran (P_{out}) untuk setiap kombinasi diameter piezoelektrik dan kecepatan angin disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Daya Keluaran

Diameter Piezoelektrik (mm)	Daya Keluaran (W)		
	Kecepatan 3 m/s	Kecepatan 5 m/s	Kecepatan 8 m/s
35	3,044	4,015	5,455
50	4,374	6,137	9,162

Berdasarkan seluruh hasil pengukuran dan perhitungan, daya keluaran terbesar diperoleh pada diameter 50 mm dengan kecepatan angin 8 m/s, yaitu 9,162 watt, sedangkan daya keluaran terkecil (P_{out}) ditemukan pada diameter 35 mm dengan kecepatan angin 3 m/s, yaitu 3,044 watt. Temuan ini menunjukkan bahwa semakin besar diameter piezoelektrik dan semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar pula energi getaran yang dapat dikonversi menjadi listrik.

Efisiensi Generator pada Variasi Diameter Piezoelektrik

Efisiensi generator dihitung menggunakan Persamaan 2 dan Persamaan 3, yang diawali dengan menentukan daya masuk (P_{in}) berdasarkan data kecepatan angin (v) dan luas area sapuan angin (A). Pada penelitian ini, digunakan nilai $A = 1,032 \text{ m}^2$ dan densitas udara $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

1. Perhitungan Daya Masuk (P_{in})

- Kecepatan angin 3 m/s (v_1):

$$P_{in} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 1,032 \times 3^3$$

$$P_{in} = 17,0667 \text{ watt}$$

- Kecepatan angin 5 m/s (v_2):

$$P_{in} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 1,032 \times 5^3$$

$$P_{in} = 79,0125 \text{ watt}$$

- Kecepatan angin 8 m/s (v_3):

$$P_{in} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 1,032 \times 8^3$$

$$P_{in} = 323,6352 \text{ watt}$$

Hasil tersebut memperlihatkan bahwa daya masuk (P_{in}) meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya kecepatan angin.

2. Efisiensi Daya Generator (η_G) untuk Diameter Piezoelektrik 35 mm

Nilai efisiensi generator dihitung menggunakan perbandingan antara daya keluaran dengan daya masuk.

- Kecepatan 3 m/s

$$\eta_G = \frac{3,044}{17,0667} \times 100\% = 17,84\%$$

- Kecepatan 5 m/s

$$\eta_G = \frac{4,015}{79,0125} \times 100\% = 5,10\%$$

- Kecepatan 8 m/s

$$\eta_G = \frac{5,455}{323,6352} \times 100\% = 1,70\%$$

3. Efisiensi Daya Generator (η_G) untuk Diameter Piezoelektrik 50 mm

- Kecepatan 3 m/s

$$\eta_G = \frac{4,374}{17,0667} \times 100\% = 25,63\%$$

- Kecepatan 5 m/s

$$\eta_G = \frac{6,137}{79,0125} \times 100\% = 7,77\%$$

- Kecepatan 8 m/s

$$\eta_G = \frac{9,162}{323,6352} \times 100\% = 2,83\%$$

Nilai efisiensi daya generator (%) untuk masing-masing diameter piezoelektrik dan kecepatan angin ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Perhitungan Efisiensi Daya Generator

Diameter Piezoelektrik (mm)	Efisiensi Daya Generator (%)		
	Kecepatan 3 m/s	Kecepatan 5 m/s	Kecepatan 8 m/s
35	17,84	5,1	1,7
50	25,63	7,77	2,83

Nilai efisiensi tertinggi diperoleh pada diameter piezoelektrik 50 mm dengan kecepatan angin 3 m/s, yaitu 25,63%. Sebaliknya, efisiensi terendah tercatat pada diameter 35 mm pada kecepatan angin 8 m/s, yaitu 1,70%. Temuan ini menunjukkan bahwa diameter piezoelektrik yang lebih besar cenderung memberikan efisiensi konversi energi yang lebih baik, terutama pada kecepatan angin rendah, sementara peningkatan kecepatan angin tidak selalu meningkatkan efisiensi karena adanya batas respons mekanik piezoelektrik terhadap gaya eksitasi.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis daya keluaran dan efisiensi generator, diperoleh beberapa poin kesimpulan sebagai berikut:

1. Daya keluaran terbesar tercatat pada kecepatan angin 8 m/s dengan diameter piezoelektrik 50 mm, yaitu 9,162 watt, yang menunjukkan bahwa kombinasi diameter besar dan kecepatan angin tinggi mampu menghasilkan energi listrik paling signifikan.
2. Daya keluaran terkecil terjadi pada kecepatan 3 m/s dengan diameter piezoelektrik 35 mm sebesar 3,044 watt, menandakan bahwa kondisi angin rendah dan diameter kecil menghasilkan transfer energi mekanik yang paling minimal.
3. Efisiensi tertinggi sebesar 25,63% diperoleh pada kecepatan angin 3 m/s menggunakan diameter 50 mm, yang mengindikasikan bahwa diameter piezoelektrik yang lebih besar bekerja lebih efektif pada kondisi angin rendah.
4. Efisiensi terendah sebesar 1,70% ditemukan pada kecepatan angin 8 m/s dengan diameter 35 mm, yang menunjukkan bahwa piezoelektrik berdiameter kecil kurang mampu merespons eksitasi angin tinggi secara optimal.
5. Performa optimal generator piezoelektrik hanya dapat dicapai ketika diameter piezoelektrik selaras dengan kondisi kecepatan angin, sehingga pemilihan dimensi elemen piezoelektrik harus mempertimbangkan karakteristik lingkungan operasinya.

Sebagai saran, penelitian selanjutnya dianjurkan untuk melakukan pengujian dengan variasi diameter piezoelektrik yang disesuaikan dengan rentang kecepatan angin yang lebih beragam, sehingga dapat diperoleh konfigurasi yang menghasilkan efisiensi konversi energi yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. E. Murniati and Sudarti, "Analisis Potensi Energi Angin Sebagai Pembangkit Energi Listrik Tenaga Angin Di Daerah Banyuwangi Kota Menggunakan Database Online-BMKG," *J. Surya Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 9–16, 2021, doi: <https://doi.org/10.32502/jse.v6i1.3364>.
- [2] R. Wiser, M. Bolinger, and E. Lantz, "Assessing wind power operating costs in the United States: Results from a survey of wind industry experts," *Renew. Energy Focus*, vol. 30, pp. 46–57, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2019.05.003>.
- [3] A. Elia, M. Taylor, B. Ó Gallachóir, and F. Rogan, "Wind turbine cost reduction: A detailed bottom-up analysis of innovation drivers," *Energy Policy*, vol. 147, p. 111912, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111912>.
- [4] C. M. Asre, V. K. Kurkute, and N. J. Kanu, "Power generation with the application of vortex wind turbine," *Mater. Today Proc.*, vol. 56, pp. 2428–2436, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.228>.
- [5] I. Bahadur, "Dynamic Modeling and Investigation of a Tunable Vortex Bladeless Wind Turbine," *Energies*, vol. 15, no. 18, p. 6773, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/en15186773>.
- [6] W. Sunarlik, "Prinsip Kerja Generator," *J. Pendidik. Tek. Mesin*, p. 6, 2017.