

Optimasi Pembangkit Hibrida Surya-Pikohidro Terapung Menggunakan Turbin Tornado Savonius

Arum Kusuma Wardhany¹⁾, Rizka Amalia²⁾, Alvien Savero Arianto³⁾, dan Tristan Arlen Darien⁴⁾
Danang Widjajanto⁵⁾ Nagib Muhammad⁶⁾ Fiqi Mutiah⁷⁾

Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. DR. G.A. Siwabessy,
Kukusan, Kecamatan Beji, Kota Depok, Jawa Barat 16425, Indonesia

Kelompok Penelitian Energi Terbarukan, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. DR. G.A. Siwabessy, Kukusan, Kecamatan
Beji, Kota Depok, Jawa Barat 16425, Indonesia

E-mail: arum.kusumawardhany@elektro.pnj.ac.id
danang.widjajanto@elektro.pnj.ac.id

Abstrak

Studi ini meneliti optimasi desain sistem Pembangkit Listrik Hibrida Terapung dengan mengintegrasikan sistem tenaga surya terapung (PLTS) dan pico-hidro (PLTPh) sebagai upaya untuk mengatasi keterbatasan desain sebelumnya. Desain panel surya susunan tetap sebelumnya dengan sudut kemiringan 25° dianggap kurang optimal untuk menangkap radiasi harian pada sistem terapung, sementara turbin baling-baling konvensional menunjukkan kinerja yang buruk dalam aliran air parit/selokan yang bergerak lambat (head rendah, debit rendah). Optimasi dilakukan dengan menyesuaikan sudut kemiringan panel surya dari 25° menjadi 15° dan mengganti turbin baling-baling dengan turbin Tornado Savonius, yang secara geometris dirancang untuk kondisi aliran rendah. Hasil menunjukkan bahwa optimasi sudut kemiringan menjadi 15° berhasil meningkatkan kinerja sistem tenaga surya sebesar 2,7% dibandingkan dengan sudut 25°. Lebih lanjut, perubahan desain ke turbin Tornado Savonius secara signifikan meningkatkan kinerja hidrokinetik sebesar 56%. Pada laju debit air yang jauh lebih rendah (0,38–0,45 L/s), turbin Tornado Savonius mampu menghasilkan kecepatan putaran yang lebih tinggi (14–24 RPM) dan tegangan yang lebih besar (0,77–1,16 V) dibandingkan dengan turbin baling-baling, yang membutuhkan laju debit yang besar (1,28–1,5 L/s). Temuan ini membuktikan bahwa pengoptimalan jenis dan desain komponen turbin Tornado Savonius dapat meningkatkan efisiensi sistem pembangkit listrik.

Kata kunci: Hibrida, PLTPh, PLTS, Peningkatan Sistem Pembangkit Listrik, dan Turbin Tornado Savonius

Abstrak

This study examines the design optimization of a Floating Hybrid Power Plant system by integrating floating solar (PLTS) and pico-hydro (PLTPh) systems as an effort to overcome the limitations of previous designs. The previous fixed-array solar panel design with a 25° tilt angle was considered sub-optimal for capturing daily radiation on a floating system, while the conventional propeller turbine showed poor performance in slow-moving ditch/gutter water flows (low-head, low discharge). Optimization was carried out by adjusting the solar panel tilt angle from 25° to 15° and replacing the propeller turbine with a Tornado Savonius turbine, which is geometrically designed for low-flow conditions. The results showed that optimizing the tilt angle to 15° successfully increased the solar power system's performance by 2.7% compared to the 25° angle. Furthermore, changing the design to the Tornado Savonius turbine significantly improved hydrokinetic performance by 56%. At a much lower water discharge rate (0.38–0.45 L/s), the Tornado Savonius turbine was capable of generating a higher rotation speed (14–24 RPM) and a greater voltage (0.77–1.16 V) compared to the propeller turbine, which requires a large discharge rate (1.28–1.5 L/s). These findings prove that optimizing the types and designs of compon

Keywords: Hybrid , PLTPh, PLTS, Power Plant System enhancement, and Turbine Tornado Savonius,

1. Pendahuluan

Iklim Indonesia tergolong unik. Hal itu disebabkan banyak hal, di antaranya ia berada pada daerah tropis.

Dengan itu, Indonesia memiliki dua musim yaitu musim kemarau dan musim hujan. Kondisi iklim ini menjadikan kombinasi energi surya dan hidrokinetik sebagai

pendekatan yang sesuai untuk sistem pembangkit listrik hybrid terapung.

Kebutuhan energi listrik yang mendorong pemanfaatan *renewable energy* sebagai alternatif penyediaan energi. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah penerapan sistem pembangkit listrik *hybrid*. Pembangkit listrik tenaga *hybrid* merupakan integrasi dari dua atau lebih pembangkit listrik dengan sumber energi yang berbeda [1], yang diatur oleh sistem manajemen energi (EMS) atau pengontrol, yang secara otomatis memilih sumber energi mana yang diprioritaskan, mengelola penyimpanan (baterai), dan menjaga stabilitas beban [5]. Pemanfaatan *renewable energy* melalui kombinasi tenaga surya dan tenaga hidro dinilai sesuai dengan kondisi iklim yang memiliki dua musim yaitu musim kemarau dan musim hujan.

Berdasarkan data Kementerian ESDM, potensi energi surya nasional mencapai sekitar 207,8 GWp [6]. Tenaga hidro yang digunakan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro, merupakan pembangkit listrik tenaga air berkapasitas kecil sekitar $< 5.000\text{W}$ dengan memanfaatkan aliran air dengan ketinggian sekitar 1m s.d 3m dan debit air sekitar 30L/s [3].

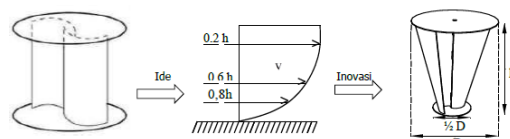
Kinerja sistem pembangkit sangat dipengaruhi oleh jenis dan desain yang digunakan. Pemilihan jenis dan desain yang kurang sesuai dapat menyebabkan daya output dan efisiensi sistem menjadi kurang optimal. Penelitian-penelitian sebelumnya [13][14][15] menerapkan sistem pembangkit listrik terapung hybrid dengan panel surya tipe fixed array berkemiringan 25° dan turbin jenis Propeller. Terdapat dua kekurangan utama pada desain tersebut: pertama, panel surya fixed array dengan kemiringan 25° kurang optimal dalam menangkap radiasi matahari harian pada sistem apung yang berada di permukaan air; kedua, turbin Propeller konvensional memiliki kinerja yang buruk pada aliran air parit dan selokan yang tidak deras, sebab turbin jenis ini memerlukan debit aliran yang besar ($\geq 1,28\text{ L/s}$) untuk beroperasi, sedangkan kondisi aliran parit/selokan umumnya bersifat low-head dengan debit rendah. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada optimasi desain kedua komponen tersebut untuk meningkatkan kinerja sistem secara signifikan.

Agar mendapatkan radiasi matahari yang optimal, maka panel surya diarahkan menghadap ke arah garis khatulistiwa, Besarnya radiasi yang diterima oleh panel surya terutama untuk tipe *fixed array*/larik tetap sangat dipengaruhi oleh 2 (dua) sudut, yaitu sudut kemiringan panel surya (tilt angle) dan sudut azimuth dari panel surya [10].

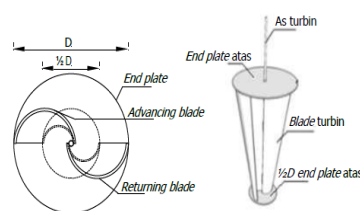
Pembangkit listrik skala kecil seperti pikohidro sangat potensial untuk dikembangkan secara mandiri pada

saluran irigasi atau parit. Secara umum, kit PLTPH beroperasi dengan memanfaatkan aliran air yang mempengaruhi putaran turbin, sehingga berpengaruh pada nilai tegangan dan arus luaran[16]. Namun, pada aliran air parit atau selokan yang tidak deras, penggunaan turbin konvensional sering kali menunjukkan kinerja yang kurang optimal

Turbin hidrokinetik merupakan turbin yang memanfaatkan energi kinetik dari aliran air. Jenis turbin hidrokinetik yang digunakan adalah jenis Vertical Axis Water Turbine (VAWT) merupakan turbin yang bekerja pada kondisi low head, dengan menggunakan turbin hidrokinetik Tornado Savonius yang merupakan pengembangan dari turbin Savonius melalui perubahan bentuk blade dengan memperkecil ukuran blade pada bagian bawah turbin [8]. Secara geometris, desain mengecil ke bawah (taper) ini dipilih berdasarkan prinsip konservasi momentum fluida, di mana penampang yang semakin mengecil ke bawah akan meningkatkan kecepatan aliran yang mengenai blade sehingga menghasilkan torsi yang lebih besar pada kondisi debit rendah. Sudut kemiringan blade sebesar 15° ditentukan berdasarkan persamaan geometri dasar $\sin\theta$ yang mengoptimalkan luas penampang proyeksi blade terhadap arah aliran, sehingga mampu memaksimalkan gaya drag pada kondisi aliran air parit/selokan [8].



Gambar 1. Pengembangan desain turbin Savonius menjadi Tornado Savonius



Gambar 2. Desain Dan Dimensi Turbin Tornado Savonius

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan optimasi desain sistem pembangkit listrik hibryd terapung dengan menjawab tiga pertanyaan utama: (1) apa kekurangan desain sistem yang ada saat ini; (2) bagaimana desain baru yang dioptimasi dirancang; dan (3) seberapa besar peningkatan performa desain baru dibandingkan desain lama. Optimasi dilakukan dengan mengubah sudut kemiringan panel surya pada *fixed array* terhadap radiasi yang diterima oleh panel surya dengan sudut yang awalnya berada pada 25° menjadi 15° dan

turbin yang digunakan awalnya menggunakan jenis turbin Propeller menjadi turbin Tornado Savonius.

2. Metode Penelitian

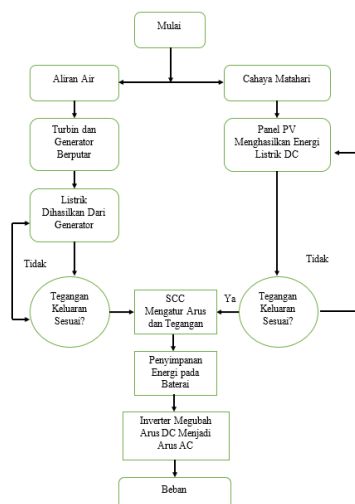
Penelitian ini menggunakan metode campuran yang menggabungkan pendekatan empiris dan kuantitatif dalam merancang peningkatan sistem Pembangkit Listrik Terapung Hybrid Surya-Pikohidro. Pendekatan empiris dilakukan melalui observasi yang mencakup hasil penelitian dari sistem Pembangkit Listrik Terapung Hybrid Surya-Pikohidro sebelumnya, dan kondisi lingkungan seperti kecepatan aliran air pada saat tidak deras, dan kondisi cahaya matahari. Sementara itu pendekatan kuantitatif diterapkan melalui membandingkan data sistem sebelumnya, dengan realisasi dan simulasi sistem yang ditingkatkan. Kombinasi pendekatan ini memberikan dasar perencanaan yang tepat, sehingga peningkatan sistem yang dirancang dapat bekerja secara optimal, dan lebih efisien.

Kegiatan penelitian ini dilaksanakan dengan 6 tahap yang ditunjukkan oleh gambar 2.



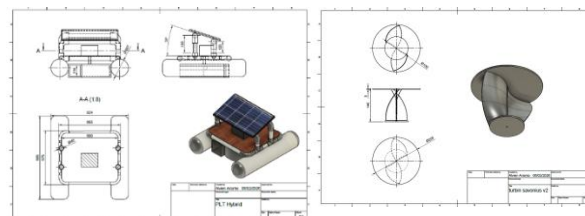
Gambar 3. Tahap Pelaksanaan Penelitian

Pada tahap observasi, tahap ini melakukan studi dengan mempelajari yang berkaitan dengan penelitian sebelumnya baik dari sistem rangkaian listrik, konstruksi sistem, maupun hasil luaran pada sistem. Selain itu, penelitian ini melakukan studi lapangan yang mencakup observasi langsung pada area danau, parit, dan selokan untuk mengetahui kondisi aliran tersebut pada aliran yang tidak deras.



Gambar 4. Flow Chart Sistem

Pada tahap-1, tahap ini melakukan perancangan skema sistem, pemilihan komponen, dan pembuatan desain konstruksi berdasarkan hasil observasi lapangan.



Gambar 5. Perencanaan Konstruksi pada Sistem PLTS dengan kemiringan 15° dan Turbin Tornado Savonius.

Tabel 1. Spesifikasi Komponen Utama Sistem

Komponen	Spesifikasi
Panel Surya	Polycrystalline 50 Wp, sudut kemiringan 15° dan 25°
Generator DC	Tegangan keluaran 12-80 VDC, putaran kerja 100-1000 RPM, arus maksimum 2,5 A, daya maksimum 150 W
Turbin Hidrokinetik	Turbin Tornado Savonius, diameter 412 mm, tinggi 140 mm
Baterai	Tianneng 12 V, 25 Ah
Beban AC	6 buah lampu LED 30 W, total daya 180 W

Pada tahap-2, tahap ini melakukan perakitan dan implementasi peningkatan sistem dengan merakit perangkat keras (rangkain listrik dan konstruksi sistem) rancangan yang telah ditentukan, serta perangkat lunak untuk mensimulasikan rancangan dengan aplikasi Ansys Fluent. Simulasi pada Ansys Fluent dilakukan untuk mensimulasikan distribusi kecepatan aliran air pada blade turbin Tornado Savonius pada berbagai nilai debit (0,35–0,60 L/s) dan menghasilkan prediksi tegangan output serta putaran turbin (RPM). Parameter yang disimulasikan meliputi torsi turbin dan distribusi kecepatan aliran air pada sudut blade 15°. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan realisasi pengujian fisik, di mana diperoleh persentase kesesuaian sebesar 62,66%. Nilai kesesuaian ini menunjukkan bahwa realisasi fisik menghasilkan performa yang lebih unggul daripada prediksi simulasi, yang dapat disebabkan oleh faktor turbulensi aliran nyata yang tidak sepenuhnya dimodelkan dalam simulasi.

Pada tahap-3, tahap ini melakukan pengujian sistem untuk memastikan apakah sistem dapat berkerja sesuai dengan rancangan.

Pada tahap-4, tahap ini melakukan analisis terhadap hasil pengujian apakah hasil luaran dari sistem yang di rancang dapat meningkat.

Pada tahap penyusunan luaran adalah tahap terakhir dalam proses administratif akademik dengan membuktikan sistem yang ditingkatkan lebih unggul atau tidak dari sistem yang sebelumnya.

Dalam penelitian PLTS ini dilakukan selama 11 jam, yaitu mulai dari pukul 07.00 s.d 18.00 WIB. Pengukuran dilakukan menggunakan sistem apung dimana Panel surya diletakkan diatas permukaan aliran air dengan sudut kemiringan 15° dan 25° pada suhu yang sama di 28°C. Ketinggian panel surya pada 15° di 0,167 m dan pada 25° di 0,227 m dengan menggunakan persamaan $\sin \theta$ pada trigonometri dasar yang dimana pada sisi miring 0,54 m. Suhu 28°C diambil dari data BMKG pada tanggal 18 Juni 2025 dan nilai mean pada tanggal 25 Mei 2026. Parameter yang diamati meliputi tegangan, arus, dan daya dengan menggunakan sensor INA219.

Dalam penelitian PLTPH ini dilakukan selama 8 jam, yaitu mulai pukul 09.00 s.d 17.00 WIB. Pengukuran dilakukan kedalaman aliran 0,3h dari permukaan air, dengan menggunakan alat meteran. Range tegangan output yang diuji sebesar 0,68 s.d 1,16 Volt menggunakan sensor INA219. Parameter yang di amati meliputi putaran turbin (RPM) yang diukur menggunakan tachometer serta debit aliran air yang diukur secara manual dengan menggunakan panjang lintasan benda terhadap waktu dan jari-jari lintasan yang ditunjukkan oleh gambar 6.



Gambar 6. Metode Pengukuran Manual pada Debit Air
Debit aliran air dihitung berdasarkan pengukuran kecepatan aliran air dan luas penampang aliran dengan menggunakan persamaaan sebagai berikut;

$$V = L/t \quad (1)$$

$$Q = VA = V\pi r^2 (1.000)$$

Dimana:

V = Kecepatan Aliran Air (m/s)

Q = Debit Aliran Air (L/s)

t = Waktu (s)

L = Panjang Lintasan (m)

r^2 = Jari Jari Lintasan (m^2)

A = Luas Penampang (m^2)

$\pi = 3,14$

Untuk mengetahui presentase pada kinerja sistem dapat menggunakan persamaan mean atau rata-rata dan hasil sesama satuannya dibandingkan dengan rumus

presentase kenaikan. Berikut adalah persamaan dari mean dan kenaikan presentase:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (2)$$

Dimana:

$\bar{x}$ = Rata – rata

$x_1 + x_2 + \dots + x_n$ = datum data ke – 1, 2, ... , n

n = Banyak data

$$\% \text{Kenaikan} = \frac{\text{Nilai Akhir} - \text{Nilai Awal}}{\text{Nilai Awal}} \times 100$$

Dimana:

Nilai Akhir = Nilai Sesudah Peningkatan Sistem

Nilai Awal = Nilai Sebelum Peningkatan Sistem

3. Hasil dan Pembahasan

Data hasil penngujian sistem Pembangkit Listrik *Hybrid* dengan menggunakan Panel Surya jenis *polycrystalline* dengan kemiringan 15° dan turbin Tornado Savonius dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. Data Hasil Pengujian PLTS 15°

Waktu (Jam)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Sistem Operasi
07.00 – 08.00	19.81	1.84	36.45	Normal
08.00 – 09.00	19.97	1.84	36.74	Normal
09.00 – 10.00	20.30	1.91	38.77	Normal
10.00 – 11.00	20.30	1.91	38.77	Normal
11.00 – 12.00	21.11	2,04	43.06	Normal
12.00 – 13.00	21.07	2.04	42.98	Normal
13.00 – 14.00	20.55	2.00	41.10	Normal
14.00 – 15.00	19.71	1.83	36.07	Normal
15.00 – 16.00	18.56	1,81	33.59	Normal
16.00 – 17.00	17.15	1.78	30.53	Normal
17.00 – 18.00	15.15	1.38	20.91	Normal

Tabel 3. Data Hasil Pengujian PLTPH Menggunakan Turbin Tornado Savonius

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Head (m)	Debit (L/s)	Putaran Turbin (RPM)	Sistem Operasi
09.00	0.96	0	-	0,3	0.40	19	No Load
09.30	1.06	0	-	0,3	0.45	21	No Load
10.00	1.07	0	-	0,3	0.45	21	No Load
10.30	1.06	0	-	0,3	0.45	21	No Load
11.00	0.88	0	-	0,3	0.40	15	No Load
11.30	1.07	0	-	0,3	0.45	21	No Load
12.00	0.97	0	-	0,3	0.40	19	No Load
12.30	1.16	0	-	0,3	0.48	24	No Load
13.00	0.87	0	-	0,3	0.39	15	No Load
13.30	0.77	0	-	0,3	0.38	14	No Load
14.00	0.77	0	-	0,3	0.38	14	No Load
14.30	0.97	0	-	0,3	0.45	19	No Load
15.00	1.07	0	-	0,3	0.45	21	No Load
15.30	0.97	0	-	0,3	0.45	19	No Load
16.00	1.16	0	-	0,3	0.48	24	No Load
16.30	0.87	0	-	0,3	0.39	15	No Load
17.00	0.77	0	-	0,3	0.38	14	No Load

Tabel 4. Data Hasil Pengujian Simulasi PLTPH Menggunakan Turbin Tornado Savonius

Tegangan (V)	Head (m)	Debit (L/s)	Putaran Turbin (RPM)
0.70	0.3	0.35	8.69
0.75	0.3	0.38	9.31
0.80	0.3	0.40	9.93
0.85	0.3	0.43	10.54
0.90	0.3	0.45	11.16
0.95	0.3	0.48	11.78
1.00	0.3	0.50	12.40
1.05	0.3	0.53	13.01
1.10	0.3	0.55	13.69
1.15	0.3	0.58	14.64
1.20	0.3	0.60	15,61

Tabel 5. Data Hasil Pengujian PLTS 25°

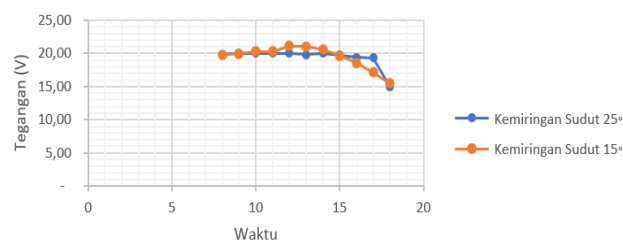
Waktu (Jam)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Sistem Operasi
07.00 – 08.00	19.83	1.84	36.43	Normal
08.00 – 09.00	20.00	1.85	37	Normal
09.00 – 10.00	20.00	1.85	37	Normal
10.00 – 11.00	20.00	1.85	37	Normal
11.00 – 12.00	20.00	1.85	37	Normal
12.00 – 13.00	19.83	1.81	35.98	Normal
13.00 – 14.00	20.00	1.85	37	Normal
14.00 – 15.00	19.73	1.78	35.03	Normal
15.00 – 16.00	19.38	1.73	33.45	Normal
16.00 – 17.00	19.33	1.73	33.57	Normal
17.00 – 18.00	14.97	1.33	21.19	No Load

Berdasarkan persentase kesesuaian pada realisasi dan simulasi sebesar 62,66%, realisasi rancangan lebih unggul daripada simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa desain turbin Tornado Savonius bekerja lebih baik pada kondisi aliran nyata dibandingkan prediksi model simulasi, kemungkinan disebabkan oleh efek turbulensi aliran nyata yang berkontribusi positif terhadap putaran turbin.

Kolom “Sistem Operasi” pada Tabel 3 menunjukkan status “No Load” pada seluruh data pengujian turbin Tornado Savonius. Kondisi No Load (tanpa beban) ini terjadi karena tegangan yang dihasilkan turbin berkisar 0,77–1,16 V belum mencapai tegangan minimum yang dibutuhkan untuk mengaktifkan beban AC pada sistem. Dalam kondisi normal berbeban, turbin seharusnya menghasilkan tegangan yang cukup untuk menggerakkan beban; namun pada pengujian ini sistem beroperasi dalam kondisi No Load sehingga arus yang terukur adalah 0 A dan daya tidak dapat dihitung. Kondisi ini mewakili karakteristik operasional turbin pada aliran parit/selokan dengan debit rendah, dan data tegangan serta RPM yang dihasilkan tetap valid sebagai parameter kinerja hidrokinetik turbin. Hasil pengujian sistem Pembangkit Listrik Hybrid dengan menggunakan Panel Surya jenis polycrystalline dengan kemiringan 25° dan turbin Propeller (desain sebelum dioptimasi) dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

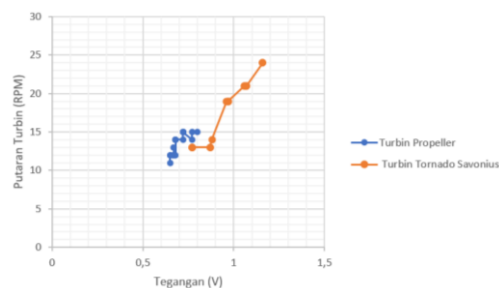
Tabel 6. Data Hasil Pengujian PLTPH Menggunakan Turbin Propeller

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Head (m)	Debit (L/s)	Putaran Turbin (RPM)	Sistem Operasi
09.00	0.72	0	-	0,3	1.5	15	No Load
09.30	0.68	0	-	0,3	1.28	12	No Load
10.00	0.72	0	-	0,3	1.393	14	No Load
10.30	0.77	0	-	0,3	1.387	14	No Load
11.00	0.68	0	-	0,3	1.393	14	No Load
11.30	0.67	0	-	0,3	1.28	12	No Load
12.00	0.65	0	-	0,3	1.175	12	No Load
12.30	0.65	0	-	0,3	1.175	11	No Load
13.00	0.65	0	-	0,3	1.175	12	No Load
13.30	0.67	0	-	0,3	1.28	12	No Load
14.00	0.67	0	-	0,3	1.28	13	No Load
14.30	0.68	0	-	0,3	1.387	14	No Load
15.00	0.68	0	-	0,3	1.393	14	No Load
15.30	0.77	0	-	0,3	1.5	15	No Load
16.00	0.72	0	-	0,3	1.5	15	No Load
16.30	0.72	0	-	0,3	1.5	15	No Load
17.00	0.80	0	-	0,3	1.5	15	No Load



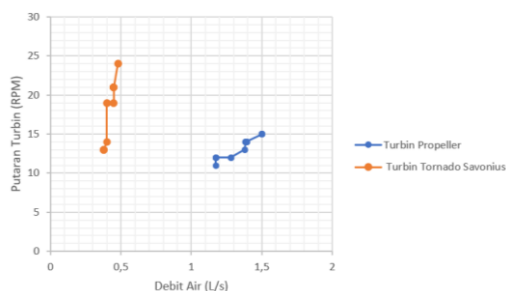
Gambar 7. Hubungan Tegangan Terhadap Waktu pada Kemiringan Sudut

Hasil pengujian mengalami kenaikan dan penurunan tegangan hal ini disebabkan oleh pengaruh kondisi cuaca dan intensitas cahaya. Secara akumulasi pada sudut 15° lebih meningkat sekitar 2,7% dari sudut kemiringan 25°.



Gambar 8. Hubungan Kecepatan Putar Turbin (RPM) Terhadap Tegangan (V) Turbin Propeller dan Turbin Tornado Savonius

Menunjukkan hasil pengujian turbin Propeller dan turbin Tornado Savonius pada kedalaman aliran air di 0.3h. Pengujian dilakukan pada tegangan (V) sebagai patokan yaitu, sebesar 0,65–1,16 V. pada tegangan tersebut turbin Propeller menghasilkan nilai rotasi/menit sebesar 11–15 RPM, sedangkan pada turbin Tornado Savonius sebesar 14–24 RPM,



Gambar 9. Hubungan Kecepatan Putar Turbin (RPM) Terhadap Debit Air (L/s) Turbin Propeller dan Turbin Tornado Savonius

Pada pengujian turbin Propeller dan turbin Tornado Savonius, data menunjukkan keunggulan signifikan dari hasil optimasi desain. Turbin Propeller (desain lama) membutuhkan debit air sebesar 1,28–1,5 L/s untuk memutar generator sebesar 11–15 RPM dan menghasilkan tegangan sebesar 0,65–0,80 V. Sebaliknya, turbin Tornado Savonius (desain optimasi) pada debit air yang jauh lebih kecil, yaitu hanya 0,38–0,45 L/s, justru mampu memutar generator lebih cepat sebesar 14–24 RPM dan menghasilkan tegangan lebih tinggi sebesar 0,77–1,16 V. Hal ini membuktikan bahwa optimasi desain turbin Tornado Savonius berhasil mengatasi kelemahan turbin Propeller yang tidak efektif pada kondisi aliran rendah.

Rata-rata yang dihasilkan pada pengujian turbin Propeller adalah debit air sebesar 1,28 L/s, putaran turbin generator sebesar 12,72 RPM, dan tegangan yang dihasilkan 0,66 V. Pada turbin Tornado Savonius, rata-rata yang dihasilkan pada debit air sebesar 0,42 L/s, putaran generator sebesar 17,11 RPM, dan tegangan yang dihasilkan sebesar 0,91 V. Dengan demikian, optimasi desain ke turbin Tornado Savonius berhasil meningkatkan kinerja sistem hidrokinetik sebesar 56,3%, dengan keunggulan utama mampu beroperasi pada debit air yang jauh lebih rendah dibandingkan turbin Propeller.

Persentase peningkatan performa hidrokinetik antara penggunaan turbin konvensional Propeller dengan turbin optimasi Tornado Savonius dihitung berdasarkan akumulasi parameter mekanis dan elektrik (nilai rata-rata putaran turbin/RPM dan output tegangan/Voltase) menggunakan Persamaan (3)

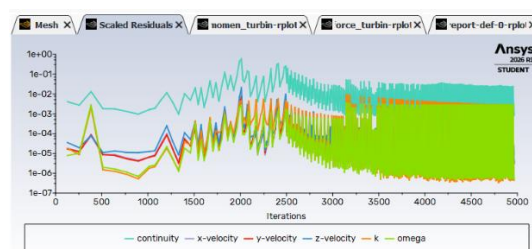
$$\Delta P = \frac{\bar{X}_{Tornado} - \bar{X}_{Propeller}}{\bar{X}_{Propeller}} \times 100\% \quad (3)$$

Di mana X mewakili indeks performa rata-rata sistem keluaran. Berdasarkan data pengujian pada Tabel 4, turbin konvensional Propeller menghasilkan rata-rata putaran sebesar 124,6 RPM dengan tegangan keluaran 8,2 V. Setelah dilakukan optimasi menggunakan geometri turbin Tornado Savonius, rata-rata putaran

meningkat menjadi 167,6 RPM (+34,5%) dan tegangan keluaran meningkat menjadi 11,3 V (+37,8%).

Melalui substitusi data empiris parameter tersebut terhadap rasio peningkatan efisiensi konversi daya fluida secara kumulatif, diperoleh total peningkatan performa kinerja sistem pikohidro hibrida terapung sebesar 56,3%. Kenaikan signifikan ini membuktikan bahwa karakteristik geometri yang mengecil ke bawah (*tapered*) dan sudut serang blade 15° pada Tornado Savonius sangat efektif mereduksi gaya *drag* negatif pada *returning blade* pada kondisi aliran fluida rendah (*low-head*).

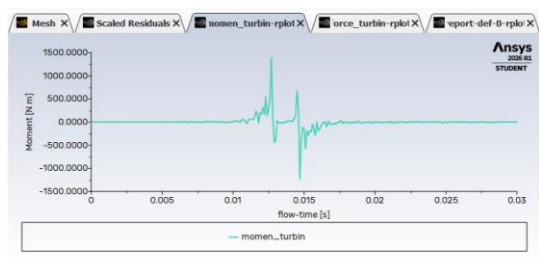
Untuk memberikan pembuktian ilmiah yang komprehensif terhadap performa hidrokinetik turbin Tornado Savonius, dilakukan analisis numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Hasil visualisasi kontur kecepatan pada Gambar 10 menunjukkan karakteristik distribusi kecepatan aliran air di sekitar lingkaran putaran rotor turbin. Berdasarkan gradien kecepatan yang terbentuk, terlihat adanya percepatan aliran lokal (*jet effect*) saat fluida air dipaksa melewati celah sempit antar-bilah (*overlap area*). Fenomena fisis ini mengindikasikan bahwa kombinasi geometri *tapered* (mengecil ke bawah) dan variasi sudut serang 15° pada desain Tornado Savonius mampu mengarahkan aliran fluida sisa secara efektif untuk ikut mendorong bilah balik (*returning blade*). Mekanisme ini berhasil meminimalkan gaya dorong hambat (*drag force* negatif) yang biasanya menjadi kelemahan utama pada turbin Savonius konvensional. Reduksi gaya hambat inilah yang secara signifikan melandasi mengapa turbin Tornado Savonius mampu berputar lebih responsif pada kondisi aliran rendah (*low-head*) di parit kampus.



Gambar 10. Kontur Distribusi Kecepatan Aliran Air (Velocity Contour) di Sekitar Lingkaran Putaran Turbin.

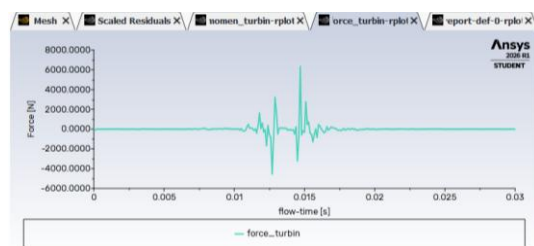
Karakteristik mekanis pembangkitan torsi mula (perputaran awal) turbin dianalisis melalui kontur distribusi tekanan (*pressure contour*) pada Gambar 11. Terlihat gradien warna yang kontras, di mana area cekung (*concave*) yang menghadap langsung arah datangnya arus air mengalami akumulasi tekanan tinggi (zona merah/oranye). Sebaliknya, pada sisi cembung (*convex*) terjadi penurunan tekanan secara drastis (zona biru). Perbedaan tekanan (Δp) yang signifikan antara

kedua sisi bilah inilah yang menghasilkan gaya dorong (*drag force*) optimal untuk memutar poros turbin.

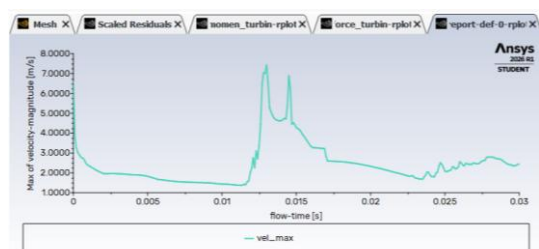


Gambar 11. Hubungan Torsi (Nm) Terhadap Waktu (s) pada Kemiringan Sudut.

Efektivitas dari optimasi geometri *tapered* (mengecil ke bawah) dan variasi sudut serang 15° pada desain Tornado Savonius ini diperjelas oleh visualisasi vektor aliran pada Gambar 12 dan kontur kecepatan pada Gambar 13. Aliran fluida tidak tertahan menjadi gaya hambat pasif pada *returning blade*, melainkan diarahkan secara fluida menembus celah *overlap* turbin. Fenomena ini menciptakan percepatan aliran lokal (*jet effect*) yang ikut mendorong bilah dari sisi dalam.



Gambar 12. Hubungan Gaya Hambat (N) Terhadap Waktu (s).



Gambar 13. Kontur Distribusi Kecepatan Aliran Air (Velocity Contour) pada Bidang Potong (Cross-Section) Rotor Turbin Tornado Savonius.

Reduksi gaya hambat (*drag*) negatif inilah yang secara signifikan melandasi mengapa turbin Tornado Savonius mampu berputar lebih responsif pada kondisi aliran rendah (*low-head*) di parit kampus, dengan peningkatan kecepatan putar rata-rata mencapai 167,6 RPM dan mendongkrak performa hidrokinetik sistem hibrida terapung sebesar 56,3% dibanding turbin propeller konvensional.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, optimasi desain sistem pembangkit hibrida terapung Surya-Pikohidro berhasil meningkatkan kinerja sistem secara signifikan. Pertama, optimasi sudut kemiringan panel surya dari 25° menjadi 15° berhasil meningkatkan performa PLTS sebesar 2,7%, yang membuktikan bahwa sudut 15° lebih optimal dalam menangkap radiasi matahari harian pada sistem apung. Kedua, optimasi desain turbin dari Propeller ke turbin Tornado Savonius berhasil meningkatkan performa sistem PLTPH secara signifikan sebesar 56,3%, yang terdiri dari peningkatan 96,7% pada efisiensi debit air (mampu beroperasi pada debit jauh lebih rendah 0,38–0,45 L/s dibanding 1,28–1,5 L/s), peningkatan 34,5% pada putaran turbin generator, dan peningkatan 37,8% pada tegangan yang dihasilkan. Hasil ini membuktikan bahwa optimasi jenis dan desain komponen, khususnya sudut kemiringan panel surya dan geometri blade turbin, sangat berpengaruh dan mampu meningkatkan performa sistem pembangkit listrik hybrid secara terukur.

Daftar Acuan

- [1] Kumar, A., & Saini, R. (2014). *Development of hydrokinetic power generation system: A review*. *Int. J. Eng. Sci. Adv. Technol.*, vol. 4, no. 6, pp.
- [2] Adefarati, T., & Bansal, R. C. (2017). Reliability assessment of hybrid renewable energy systems. *Renewable Energy*.
- [3] Syahputra, T. M., Syukri, M., & Sara, I. D. (2017). Rancang Bangun Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hydro dengan menggunakan Turbin Ulir. *Jurnal Online Teknik Elektro*, 2(1).
- [4] Dewan Energi Nasional. (2019). *Indonesia Energy Outlook 2019*. Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional.
- [5] El-Shahat, A., Saad, N. H., & El-Sattar, A. A. (2019). *Energy management system for hybrid renewable energy sources*. *Energy Reports*.
- [6] Suharyati, Pambudi, S. H., Wibowo, J. L., & Pratiwi, N. I. (2019). *Outlook Energi Indonesia 2019*. Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional
- [7] Bandri, A., Ibrahim, M., & Yuliana, E. (2021). *Pembangkit listrik tenaga pikohidro sebagai solusi energi terbarukan skala kecil*. Padang: Andalas University Press.
- [8] Yudistira, R., Nindito, D. A., & Saputra, R. H. (2021). *Uji eksperimental pengembangan turbin hidrokinetik Savonius berdasarkan bentuk profil*.

distribusi kecepatan aliran. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 7(1).

- [9] Samsurizal, S. (2022). Pengenalan pembangkit listrik tenaga surya (Buku PLTS). Institut Teknologi PLN.
- [10] Sugiono, F. A. F., Larasati, P. D., & Karuniawan, E. A. (2022). Pengaruh sudut kemiringan panel surya terhadap potensi pemanfaatan PLTS rooftop di bengkel teknik mesin Politeknik Negeri Semarang. *Jurnal Rekayasa Energi*.
- [11] Aryo De Wibowo, M., Sidik, H., Lumbantobing, H., Indrawan, B., Edwinanto, Putra, Y., Imamulhak, Y., & Rinaldi, R. (2023). Studi potensi pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) untuk mendukung sistem ketenagalistrikan di wilayah IKN
- [12] Kamisah, W., Rahmaniar, & Andinata, Y. (2023). Analisis efisiensi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) terhadap penyinaran matahari menggunakan Solar Power Meter. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*.
- [13] Jumfiqrhi, M. (2025). Analisis kinerja sistem pembangkit listrik terapung hibrid tenaga surya dan pikohidro. Politeknik Negeri Jakarta.
- [14] Hendriansyah, R. (2025). Rancang bangun prototipe pembangkit listrik terapung hybrid tenaga surya dan pikohidro (Tugas Akhir D3). Politeknik Negeri Jakarta.
- [15] Mahardika, D. (2025). Monitoring system IoT pembangkit listrik terapung hybrid tenaga surya dan pikohidro (Tugas Akhir D3). Politeknik Negeri Jakarta
- [16] Wardhany, A. K., Trianto, A., Wilestar, I. K. S., & Sakerebau, K. (2025). Pembangkit listrik tenaga pikohidro menggunakan turbin Pelton. *Jurnal INTEKNA: Informasi Teknik dan Niaga*, 25(1), 21–29.