Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi
Vol 12 No. 2, Oktober 2026
P-ISSN : 2477-5029
E-ISSN : 2502-0498

Pengaruh Sudut Deflektor terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius Dua Sudu dengan Sudut Puntir 180°

M Ilham Nur[1*], Haslinda H.S[2], Bahdin Ahad Badia[3]
[1,2] Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pejuang Republik Indonesia, Makassar, Indonesia
[3] Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia
e-mail: ***[1] ilhamnuri3464@gmail.com**

Abstrak

Turbin angin Savonius mampu bekerja pada kecepatan angin rendah, tetapi koefisien dayanya terbatas oleh torsi negatif pada sudu yang bergerak melawan arah angin. Penelitian eksploratif ini mengevaluasi pengaruh sudut deflektor terhadap torsi, daya mekanik, dan koefisien daya (C_p) turbin Savonius dua sudu dengan sudut puntir 180° dan diameter rotor 250 mm. Pengujian dilakukan pada terowongan angin terbuka dengan penggerak blower pada kecepatan sekitar 10–11 m/s untuk empat konfigurasi, yaitu tanpa deflektor serta deflektor bersudut 30°, 45°, dan 60°. Kecepatan angin rata-rata berturut-turut 10,07; 10,54; 10,88; dan 11,10 m/s sehingga tidak seragam antarkonfigurasi dan lebih tinggi daripada kondisi angin rendah; hasil ini tidak mewakili kinerja pada angin rendah. Beban diberikan bertahap melalui tali dan pulley hingga rotor berhenti; putaran dibaca lima kali pada setiap titik beban dengan takometer, dan kurva pembebanan setiap konfigurasi hanya dijalankan satu kali. Pada titik-titik uji yang tersedia, torsi stall nominal naik dari 3,14 N·m (tanpa deflektor) menjadi 4,32 N·m (60°), daya mekanik maksimum dari 8,68 W menjadi 14,24 W, dan C_p maksimum dari 16,29% menjadi 19,95% (naik 3,66 poin persentase atau 22,5% secara relatif). Daya angin yang tersedia pada 60° juga 33,9% lebih besar daripada tanpa deflektor, dan pengaruh kecepatan angin belum terpisahkan secara eksperimental dari pengaruh sudut deflektor. Analisis ketidakpastian menunjukkan bahwa hanya selisih C_p pada 60° yang terpisah dari ketidakpastian acak (k = 2), sedangkan nilai absolut C_p memiliki ketidakpastian besar. Pemeriksaan kewajaran menunjukkan bahwa torsi nominal dan rasio kecepatan ujung pada daya maksimum (0,08–0,09) tidak lazim, sehingga hasil absolut hanya bersifat indikatif. Sudut 60° adalah kondisi terbaik di antara titik yang diuji dan belum menunjukkan sudut optimum. Hasil ini perlu dipandang sebagai data eksploratif yang memerlukan pengujian ulang pada kecepatan angin seragam.

Kata kunci*Turbin angin Savonius, deflektor, sudut puntir, torsi stall, koefisien daya*

Abstract

Savonius wind turbines can operate at low wind speeds, but their power coefficient is limited by negative torque on the returning blade. This exploratory study evaluates the effect of deflector angle on the torque, mechanical power, and power coefficient (C_p) of a two-blade Savonius turbine with a 180° twist angle and a 250 mm rotor diameter. Tests were carried out in an open-circuit wind tunnel driven by a blower at about 10–11 m/s for four configurations: no deflector and deflector angles of 30°, 45°, and 60°. The mean wind speeds were 10.07, 10.54, 10.88, and 11.10 m/s, so the speed was not uniform across configurations and higher than low-wind conditions; the results do not represent low-wind performance. Load was applied incrementally through a rope and pulley until the rotor stopped; rotational speed was read five times at each load point with a tachometer, and the loading curve of each configuration was run only once. At the tested points, the nominal stall torque rose from 3.14 N·m (no deflector) to 4.32 N·m (60°),

maximum mechanical power from 8.68 W to 14.24 W, and maximum C_p from 16.29% to 19.95% (3.66 percentage points, or 22.5% in relative terms). The available wind power at 60° was also 33.9% higher than without a deflector, and the effect of wind speed could not be separated experimentally from that of the deflector angle. The uncertainty analysis indicates that only the C_p difference at 60° is separable from random uncertainty (k = 2), while absolute C_p values carry large uncertainty. Plausibility checks show that the nominal torque and the tip speed ratio at maximum power (0.08–0.09) are unusual, so absolute results are indicative only. The 60° angle gave the best result among the tested points and does not represent a general optimum. The results should be treated as exploratory data requiring repetition at uniform wind speed.

Keywords*Savonius wind turbine, deflector, twist angle, stall torque, power coefficient*

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi angin untuk pembangkitan listrik di Indonesia telah dikaji dari aspek pembangkitan energinya [1]. Kecepatan angin di banyak lokasi umumnya tergolong rendah sehingga diperlukan turbin yang mampu bekerja pada kecepatan tersebut. Turbin angin sumbu vertikal (vertical axis wind turbine, VAWT) menarik untuk kondisi ini karena tidak memerlukan pengarah terhadap arah angin dan dapat dipasang di lingkungan perkotaan [2].

Di antara jenis VAWT, turbin Savonius termasuk rotor tipe hambat (drag) yang sederhana dan mudah dibuat, tetapi koefisien dayanya relatif kecil karena sudu yang kembali melawan angin menimbulkan torsi negatif [3], [4]. Penelitian turbin Savonius di Indonesia mencakup rancang bangun dan pengujian berbagai bentuk sudu, antara lain tipe-U empat sudu [5] dan tipe-L untuk rumah tinggal [6], serta analisis pembangkitan listrik dengan turbin Savonius [7]. Pada turbin sumbu horizontal, simulasi pengaruh jumlah dan panjang sudu terhadap daya juga telah dilakukan [8].

Upaya meningkatkan kinerja Savonius ditempuh melalui dua jalur. Jalur pertama adalah modifikasi geometri sudu. Rotor heliks telah dibandingkan dengan Savonius dua tingkat secara numerik dan eksperimental [9], rotor mikro dua tingkat dengan sudu berpuntir dianalisis dengan model turbulensi k-ω SST [10], dan sudu twist dengan variasi tertutup dan terbuka dirancang dan diuji secara lokal [11]. Optimasi bentuk sudu memakai algoritma genetika [12], jaringan saraf tiruan [13], dan optimasi bentuk dengan validasi eksperimen [4], sedangkan tinjauan tentang desain sudu berbasis kecerdasan buatan merangkum arah pengembangan terbaru [14]. Simulasi CFD terhadap parameter aliran rata-rata di sekitar rotor [15] melengkapi pendekatan eksperimen tersebut.

Jalur kedua adalah memodifikasi aliran yang masuk ke rotor. Rotor berbilah elips dengan ventilasi diuji di terowongan angin dan disimulasikan secara numerik [16], rotor Savonius termodifikasi dengan elemen eksternal diteliti untuk sistem lampu jalan [17], kontrol aliran hulu dikaji pada berbagai kondisi operasi [18], dan peningkatan aliran serta pertukaran momentum dioptimalkan pada rotor hambat [3]. Pelat pengalih atau deflektor menarik karena sederhana dan murah. Deflektor belakang diuji dengan towing tank dan CFD dua dimensi, dan pada penempatan sejauh 0,82 kali diameter turbin pengaruhnya terhadap koefisien daya kurang dari 3% [19]. Pada turbin Savonius hidrolik, optimasi pelat deflektor tebal meningkatkan koefisien daya sekitar 11% pada $\lambda = 1{,}1$ dan hampir 15% pada $\lambda = 1{,}2$ tanpa menghilangkan kemampuan self-starting [20]. Pada rotor Savonius tiga sudu yang diuji di terowongan angin pada 7,0 m/s untuk aplikasi hidrokinetik, dua pelat deflektor di hulu memperbaiki kemampuan self-starting dengan koefisien daya maksimum 0,183 [21]. Studi lain membandingkan berbagai konfigurasi deflektor pada angin dan air [22], menelaah sudut deflektor untuk turbin hidrokinetik di sungai kecil pada bilangan Reynolds $1{,}48\times10^5$ dengan koefisien daya maksimum 0,21 [23], dan menganalisis deflektor hulu terhadap performa start rotor hidrokinetik tipe hambat [24]. Untuk rotor heliks, penambahan deflektor baru dikaji pada konteks arus air. Konfigurasi terbaik pada studi [25] mengangkat

koefisien daya puncak dari 0,125 ($\lambda = 0,7$, tanpa deflektor) ke 0,14, sedangkan simulasi pada [26] memberi kenaikan dari 0,1247 ke 0,168 pada λ yang sama. Pada rotor dua sudu konvensional di terowongan angin, pelat yang ditempatkan di depan sudu kembali ternyata menurunkan kecepatan yang dibutuhkan rotor untuk mulai berputar, dan koefisien dayanya naik 84,6% pada sudut 90° terhadap aliran [27]. Pengujian laboratorium turbin sumbu vertikal pada angin rendah juga ada untuk H-rotor dengan variasi jumlah sudu [28], namun tidak melibatkan deflektor.

Pengujian pada makalah ini dilakukan pada kecepatan sekitar 10–11 m/s, yaitu kecepatan yang diperoleh dari blower dan terowongan angin yang tersedia di laboratorium pengujian. Kecepatan ini lebih tinggi daripada kondisi angin rendah yang menjadi latar belakang penelitian, sehingga makalah ini tidak membuktikan kinerja turbin pada angin rendah; penelitian ini hanya membandingkan konfigurasi deflektor pada kondisi uji yang tersedia sebagai langkah penjajakan.

Dalam pustaka yang ditinjau, deflektor pada rotor heliks baru diteliti untuk arus air [25], [26], sementara kajian di udara memakai rotor Savonius konvensional [21]–[23], [27]. Data eksperimen di udara untuk rotor Savonius dua sudu berpuntir 180° dengan deflektor bersudut belum ditemukan. Perbedaan media bukan satu-satunya dasar kebaruan; kontribusi spesifik makalah ini adalah kombinasi sudut puntir 180°, konfigurasi dua sudu, dan sudut pelat deflektor (30°, 45°, 60°) pada satu rotor yang sama dengan prosedur pembebanan yang sama.

Deflektor pada penelitian ini berupa satu pelat datar di sisi hulu rotor yang berengsel pada dinding saluran. Fungsi yang dihipotesiskan adalah mengurangi aliran yang mengenai sudu kembali sebagaimana dilaporkan pada rotor konvensional [21], [27] dan, secara hipotetis, mengarahkan sebagian aliran ke sudu maju; kedua fungsi ini tidak diverifikasi dengan visualisasi aliran. Tiga sudut 30°, 45°, dan 60° dipilih sebagai penjajakan awal dengan selang 15°, bukan hasil optimasi sebelumnya. Hipotesis kerja: pada rentang tersebut, makin besar sudut deflektor makin besar torsi stall, daya mekanik, dan koefisien daya (C_p). Tujuan makalah ini adalah menguji hipotesis tersebut secara eksperimental dengan membandingkan torsi, daya mekanik, dan C_p turbin Savonius dua sudu berpuntir 180° pada tiga sudut deflektor terhadap kondisi tanpa deflektor. Sumbangan makalah ini adalah satu set data eksploratif pada konfigurasi yang diuji beserta telaah kritis atas pengaruh kecepatan angin yang berbeda antarkonfigurasi; karena kecepatan angin tidak seragam dan setiap kurva pembebanan hanya dijalankan sekali, hasilnya belum dapat mengisolasi pengaruh sudut deflektor secara meyakinkan.

2. METODE PENELITIAN

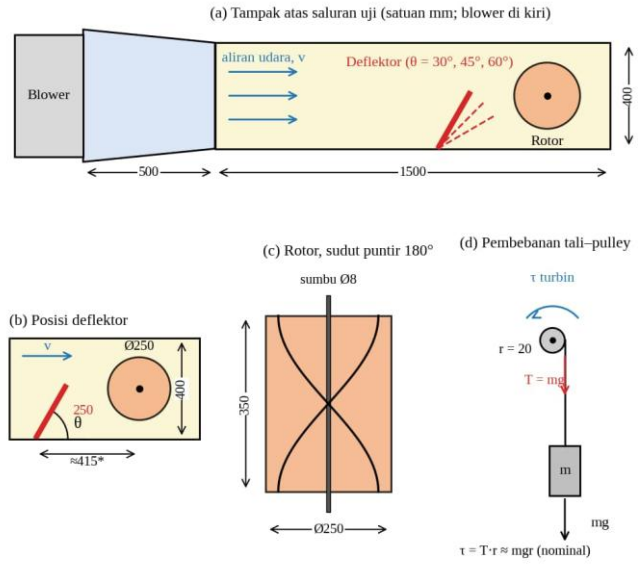
2.1 Desain dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini bersifat eksperimental dan eksploratif. Pengujian dilaksanakan di Laboratorium ATI Makassar pada Mei sampai Juli 2025, mulai dari perancangan alat, pembuatan alat, hingga pengambilan data. Objek uji adalah rotor Savonius dua sudu dengan sudut puntir 180°, diameter D = 250 mm, dan tinggi h = 350 mm (Gambar 1c). Luas $A = D \cdot h = 0,25\ m \times 0,35\ m \approx 0,088\ m^2$ adalah luas proyeksi (sapuan) rotor saja; luas ini tidak mencakup pelat deflektor dan bukan luas tangkapan sistem. Rotor dan deflektor dibuat dari bahan antara lain pipa PVC dan akrilik. Rotor dipasang pada saluran uji berpenampang 400 mm × 400 mm dengan bagian lurus sepanjang 1500 mm yang didahului bagian penyempit sepanjang 500 mm dari blower (Gambar 1a). Berdasarkan gambar rancangan alat, rasio sumbatan (luas proyeksi rotor terhadap luas penampang saluran) sebesar $0,0875/0,16 \approx 0,55$ tanpa memperhitungkan deflektor. Nilai ini tinggi sehingga kecepatan lokal di sekitar rotor dapat berbeda dari kecepatan yang terbaca, dan tidak dilakukan koreksi sumbatan. Deflektor berupa satu pelat datar sepanjang 250 mm yang berengsel pada dinding saluran di sisi hulu rotor, dengan jarak engsel ke sumbu rotor sekitar 415 mm (diperkirakan dari skala gambar rancangan). Tinggi dan tebal pelat tidak tercatat pada data penelitian sehingga tidak dapat dilaporkan. Sudut θ diukur antara pelat dan arah aliran (dinding saluran) dan divariasikan 30°, 45°, dan 60° (Gambar 1b). Variabel bebas adalah sudut deflektor

(tanpa deflektor, 30°, 45°, dan 60°), sedangkan variabel terikatnya adalah putaran, torsi, daya mekanik turbin, dan koefisien daya. Parameter pengujian dirangkum pada Tabel 1 dan susunan alat beserta dimensinya ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 1. Parameter pengujian

Parameter	Nilai
Jumlah sudu; sudut puntir	2 sudu; 180°
Diameter rotor, D; tinggi rotor, h	250 mm; 350 mm
Diameter poros	8 mm
Luas proyeksi rotor, A = D·h	0,088 m² (rotor saja)
Saluran uji (penampang; panjang lurus)	400 mm × 400 mm; 1500 mm
Rasio sumbatan (A/luas penampang saluran)	≈ 0,55 (tanpa deflektor)
Jari-jari pulley, r	0,02 m
Deflektor	satu pelat datar, panjang 250 mm; θ = tanpa deflektor, 30°, 45°, 60° terhadap arah aliran
Sumber angin	blower dan terowongan angin terbuka
Suhu udara; massa jenis udara, ρ	24,9 °C; 1,186 kg/m³
Bilangan Reynolds, Re = ρvD/μ	$1{,}6\times10^5$ sampai $1{,}8\times10^5$
Anemometer	UNI-T UT363; resolusi 0,1 m/s; akurasi ±(5% bacaan + 0,5 m/s); 5 pembacaan per variasi
Takometer	DT-6236B; resolusi 0,1 rpm; 5 pembacaan per titik beban
Timbangan beban	SF-400; resolusi 1 g
Pembebanan	pasir, bertahap 1 kg hingga rotor berhenti; satu kurva per variasi



Gambar 1. Skema dan dimensi pengujian (satuan mm): (a) tampak atas saluran uji; (b) posisi deflektor dengan θ diukur antara pelat dan arah aliran; (c) rotor berpuntir 180°; (d) skema pembebanan tali–pulley dan diagram gaya. Tanda * menunjukkan jarak yang diperkirakan dari skala gambar rancangan.

2.2 Instrumen dan Prosedur Pengujian

Aliran udara dibangkitkan oleh blower dan disalurkan melalui terowongan angin terbuka. Kecepatan angin diukur dengan anemometer baling-baling digital UNI-T UT363 (resolusi 0,1 m/s; akurasi pabrikan ±(5% bacaan + 0,5 m/s)) sebanyak lima kali untuk setiap variasi dan dirata-ratakan; posisi anemometer terhadap rotor dan deflektor tidak tercatat pada data penelitian. Suhu udara diukur dengan termometer. Putaran poros diukur dengan takometer digital DT-6236B (resolusi 0,1 rpm) dan dibaca lima kali pada setiap titik beban. Beban berupa pasir ditimbang dengan timbangan digital SF-400 (resolusi 1 g) dan digantungkan melalui tali pada pulley berjari-jari r = 0,02 m yang terpasang pada poros rotor (Gambar 1d). Pengujian diawali dengan mengukur putaran tanpa beban, kemudian beban ditambah bertahap sebesar 1 kg hingga rotor berhenti berputar, dan lima pembacaan putaran dicatat pada setiap titik beban. Prosedur yang sama dilakukan untuk setiap sudut deflektor, tetapi kurva pembebanan setiap konfigurasi hanya dijalankan satu kali dan kecepatan angin tidak disamakan antarkonfigurasi. Torsi dihitung dari berat beban dengan menganggapnya sebagai gaya tangensial bersih pada jari-jari pulley; gesekan tali–pulley, gesekan bantalan, dan massa tali tidak dikarakterisasi. Arah gerak beban selama pengujian (terangkat, tertahan diam, atau bekerja sebagai pengereman gesek) tidak didokumentasikan pada data penelitian, sehingga torsi nominal hanya berlaku bila anggapan tersebut terpenuhi.

2.3 Pengolahan Data

Daya angin yang melewati rotor dihitung dengan

$$P_{\text{in}} = \frac{1}{2}\rho A v^3 \tag{1}$$

dengan ρ massa jenis udara (1,186 kg/m³ pada 24,9 °C), A luas proyeksi rotor (D·h), dan v kecepatan angin rata-rata.

$$\tau = Fr = mgr \tag{2}$$

dengan F gaya beban, m massa beban, g percepatan gravitasi (9,81 m/s²), dan r jari-jari pulley. Persamaan (2) menghasilkan torsi nominal yang benar bila berat beban adalah gaya tangensial bersih pada pulley. Kecepatan sudut dan daya mekanik turbin dihitung dengan (π = 3,14)

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \tag{3}$$

$$P_{\text{t}} = \tau\omega \tag{4}$$

dengan n putaran poros dalam rpm. Koefisien daya C_p (dinyatakan dalam persen) dan rasio kecepatan ujung (tip speed ratio) dinyatakan dengan

$$C_{\text{p}} = \frac{P_{\text{t}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \tag{5}$$

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \tag{6}$$

dengan R jari-jari rotor (0,125 m). Rasio kecepatan ujung pada makalah ini dihitung dengan jari-jari rotor, bukan jari-jari pulley, agar dapat dibandingkan dengan literatur. Torsi maksimum dibaca pada kondisi rotor berhenti (torsi stall), sedangkan daya mekanik dan C_p maksimum dibaca pada beban yang menghasilkan nilai tertinggi; torsi stall berbeda dari torsi pada daya maksimum. Selisih antarkonfigurasi dinyatakan dalam dua cara yang dibedakan: poin persentase (pp) untuk selisih C_p dan persen relatif untuk rasio terhadap kondisi tanpa deflektor.

2.4 Analisis Ketidakpastian

Ketidakpastian dievaluasi dengan pendekatan GUM sederhana pada tingkat k = 1 dan dinyatakan sebagai ketidakpastian diperluas U dengan k = 2. Komponen Tipe A diambil dari simpangan baku rata-rata (s/√5) lima pembacaan kecepatan angin dan lima pembacaan putaran.

Komponen Tipe B kecepatan angin berasal dari akurasi pabrikan anemometer ±(5% bacaan + 0,5 m/s) dengan distribusi segiempat, sedangkan untuk putaran dan massa berasal dari resolusi alat (0,1 rpm dan 1 g). Ketidakpastian jari-jari pulley diperkirakan 0,29 mm (setengah resolusi alat ukur panjang 1 mm, distribusi segiempat), ketidakpastian luas rotor 0,14%, dan ketidakpastian massa jenis udara diasumsikan 0,5%; ketiga nilai ini adalah perkiraan karena tidak ada data kalibrasi. Karena C_p sebanding dengan v^{-3}, ketidakpastian relatif C_p dihitung dengan

$$\frac{u_c(C_p)}{C_p} = \sqrt{\left(\frac{u_\tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{u_n}{n}\right)^2 + \left(\frac{3u_v}{v}\right)^2 + \left(\frac{u_\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{u_A}{A}\right)^2} \quad (7)$$

dengan u_τ/τ diperoleh dari ketidakpastian massa dan jari-jari pulley. Karena anemometer, pulley, massa jenis, dan luas rotor sama untuk semua konfigurasi, komponen Tipe B anemometer serta ketidakpastian jari-jari, massa jenis, dan luas dianggap bersama dan dikeluarkan saat membandingkan antarkonfigurasi; perbandingan hanya memakai komponen acak (Tipe A kecepatan angin dan komponen putaran). Ketidakpastian ini belum mencakup keterulangan kurva pembebanan karena setiap kurva hanya dijalankan satu kali.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kecepatan Angin dan Daya Angin

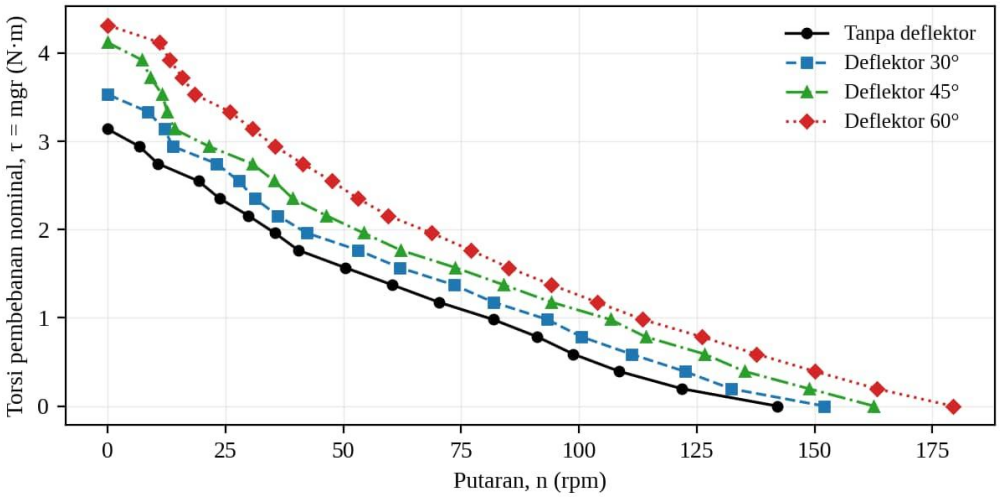
Kecepatan angin rata-rata yang terukur berbeda untuk setiap variasi, yaitu 10,07 m/s tanpa deflektor, 10,54 m/s pada 30°, 10,88 m/s pada 45°, dan 11,10 m/s pada 60° (simpangan baku lima pembacaan berturut-turut 0,42; 0,31; 0,54; dan 0,38 m/s). Bilangan Reynolds berbasis diameter rotor berkisar $1{,}6\times10^5$ sampai $1{,}8\times10^5$. Daya angin yang tersedia meningkat 33,9% dari 53,29 W menjadi 71,37 W (Tabel 2). Normalisasi dengan v^3 seperti pada C_p menyetarakan daya tetapi tidak menghilangkan pengaruh perbedaan kondisi aliran (profil kecepatan, turbulensi, dan sumbatan), sehingga selisih antarkonfigurasi tidak dapat dikaitkan sepenuhnya dengan sudut deflektor. Pengaruh ini dibahas pada Subbab 3.6.

Tabel 2. Ringkasan kinerja turbin pada setiap sudut deflektor (nilai torsi adalah torsi nominal, $\tau = mgr$)

Variasi	v (m/s)	P_{in} (W)	n bebas (rpm)	τ_{stall} (N·m)	τ pada $P_{t,maks}$ (N·m)	$P_{t,maks}$ (W)	$C_{p,maks}$ (%)	λ pada $P_{t,maks}$
Tanpa deflektor	10,07	53,29	142,08	3,14	1,37	8,68	16,29	0,078
30°	10,54	61,10	152,06	3,53	1,37	10,56	17,28	0,091
45°	10,88	67,21	162,58	4,12	1,57	12,11	18,03	0,089
60°	11,10	71,37	179,28	4,32	1,77	14,24	19,95	0,091

3.2 Torsi

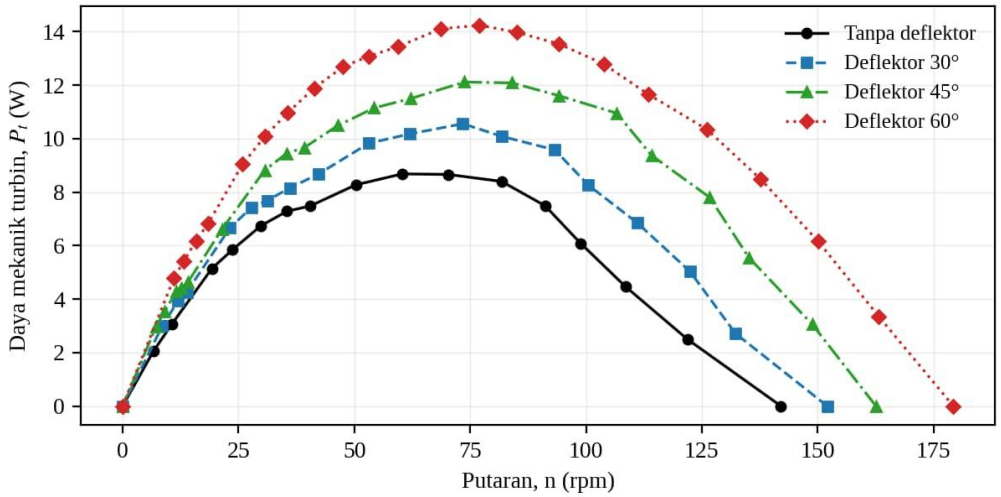
Gambar 2 menunjukkan bahwa torsi nominal menurun seiring naiknya putaran untuk seluruh variasi, dan kurva bergeser ke atas seiring bertambahnya sudut deflektor. Torsi stall, yang terbaca saat rotor berhenti, bernilai 3,14 N·m tanpa deflektor dan menjadi 3,53; 4,12; dan 4,32 N·m pada sudut 30°, 45°, dan 60°, atau naik 12,4%, 31,2%, dan 37,6% secara relatif. Rotor dengan deflektor 60° berhenti pada beban 22 kg, dibandingkan 16 kg tanpa deflektor. Putaran tanpa beban meningkat dari 142,08 rpm menjadi 179,28 rpm (naik 26,2%). Torsi stall berbeda dari torsi pada daya maksimum, yaitu 1,37; 1,37; 1,57; dan 1,77 N·m untuk keempat variasi, dan tidak dengan sendirinya menunjukkan kemampuan self-starting karena tidak dilakukan pengujian torsi awal pada beberapa posisi azimut.



Gambar 2. Torsi pembebanan nominal (τ = mgr) terhadap putaran pada berbagai sudut deflektor

3.3 Daya Turbin

Kurva daya mekanik terhadap putaran pada Gambar 3 berbentuk lonceng dengan puncak yang meningkat dan bergeser ke putaran lebih tinggi seiring bertambahnya sudut deflektor. Daya maksimum sebesar 8,68 W dicapai tanpa deflektor pada putaran 60,4 rpm dengan beban 7 kg. Dengan deflektor, daya maksimum menjadi 10,56 W pada 73,44 rpm (30°, beban 7 kg), 12,11 W pada 73,74 rpm (45°, beban 8 kg), dan 14,24 W pada 77,05 rpm dengan beban 9 kg (60°), atau naik 21,7%, 39,5%, dan 64,1% secara relatif terhadap kondisi tanpa deflektor. Kenaikan ini mencakup pengaruh daya angin yang berbeda antarvariasi (Subbab 3.6). Data setiap pasangan beban–putaran disajikan pada Lampiran A.

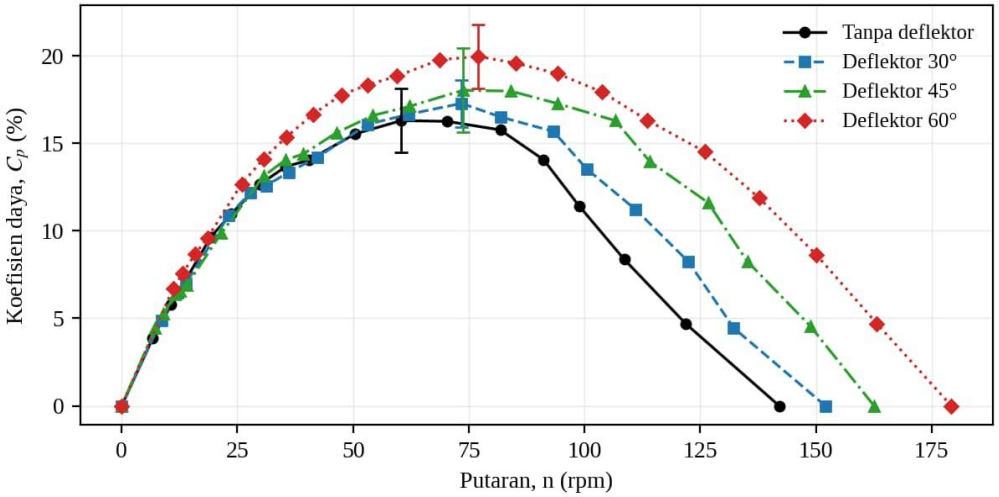


Gambar 3. Daya mekanik turbin terhadap putaran pada berbagai sudut deflektor

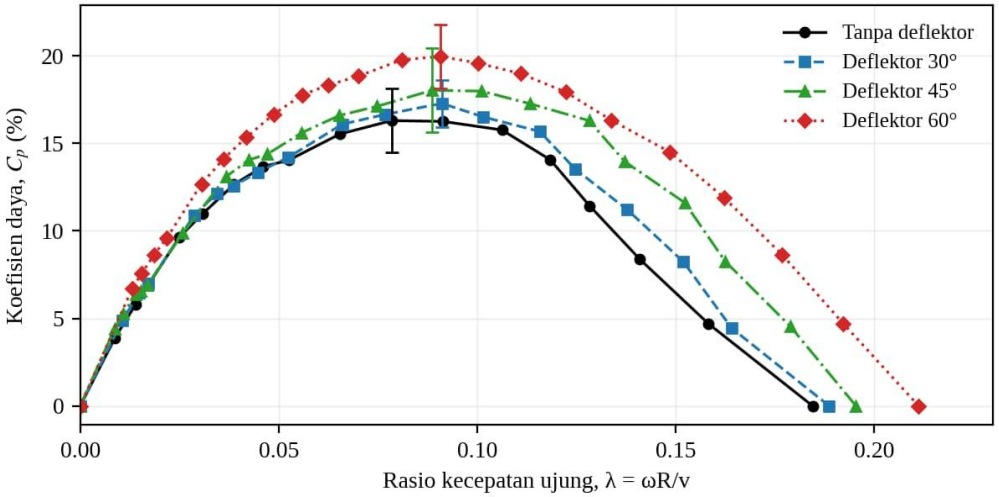
3.4 Koefisien Daya

C_p maksimum meningkat dari 16,29% tanpa deflektor menjadi 17,28%; 18,03%; dan 19,95% pada sudut 30°, 45°, dan 60° (Gambar 4). Kenaikan ini setara 0,99; 1,74; dan 3,66 poin persentase, atau 6,1%, 10,7%, dan 22,5% secara relatif. Puncak C_p selalu terjadi pada beban yang sama dengan puncak daya. Pada beban kecil, kurva keempat variasi hampir berimpit, dan perbedaan baru tampak pada putaran menengah hingga tinggi. Gambar 5 menyajikan C_p terhadap

rasio kecepatan ujung. Puncak yang teramati berada pada λ sekitar 0,08 sampai 0,09 dan kurva belum mencakup rentang λ yang lazim bagi rotor Savonius, sehingga puncak tersebut adalah puncak pada titik uji dan belum dapat disebut optimum sebenarnya.



Gambar 4. Koefisien daya terhadap putaran pada berbagai sudut deflektor. Batang galat pada puncak menunjukkan ketidakpastian komponen acak (k = 2); ketidakpastian total lebih besar (Tabel 3)



Gambar 5. Koefisien daya terhadap rasio kecepatan ujung (λ = ωR/v) dengan kecepatan angin rata-rata masing-masing konfigurasi. Batang galat seperti pada Gambar 4

3.5 Ketidakpastian Pengukuran

Tabel 3 merangkum ketidakpastian pada titik daya maksimum. Torsi nominal dan daya mekanik memiliki ketidakpastian diperluas (k = 2) sekitar 3%, yang terutama berasal dari perkiraan jari-jari pulley. Ketidakpastian kecepatan angin didominasi akurasi pabrikan anemometer, yaitu ±(5% bacaan + 0,5 m/s) atau sekitar ±1,0 m/s (kurang lebih 10%) pada 10 m/s; setelah dipangkatkan tiga, ketidakpastian relatif daya angin mencapai sekitar 17–18% (k = 1). Akibatnya nilai absolut C_p memiliki ketidakpastian diperluas sekitar ±6 sampai ±7 poin persentase (k = 2), misalnya 19,95% ± 6,85 pp pada 60°, sehingga nilai absolut C_p pada makalah ini hanya bersifat indikatif. Untuk perbandingan antarkonfigurasi dengan anemometer yang sama dipakai

komponen acak saja: rasio $C_{p,maks}$ terhadap kondisi tanpa deflektor adalah 1,060 ± 0,144 (30°), 1,106 ± 0,192 (45°), dan 1,225 ± 0,177 (60°) pada k = 2. Kenaikan pada 30° dan 45° belum dapat dibedakan dari nol, sedangkan kenaikan pada 60° terpisah dari satu tetapi dengan rentang lebar (sekitar 5% sampai 40%). Rentang ini belum mencakup keterulangan kurva dan kemungkinan galat sistematik yang berbeda antarkonfigurasi, misalnya posisi anemometer terhadap deflektor. Dua pembacaan putaran tampak menyimpang dari pembacaan lainnya (45°, beban 9 kg: 69,3 rpm terhadap kisaran 59,6–61,3 rpm; 60°, beban 2 kg: 154,9 dan 155,5 rpm terhadap kisaran 146,4–146,9 rpm); keduanya tidak memengaruhi nilai maksimum yang dilaporkan.

Tabel 3. Komponen ketidakpastian pada titik daya maksimum (u: k = 1; U: k = 2)

Variasi	v (m/s)	$u_A(v)$ (m/s)	$u_B(v)$ (m/s)	U(τ) (%)	$U(P_t)$ (%)	$U(C_p)$ acak (pp)	$U(C_p)$ total (pp)
Tanpa deflektor	10,07	0,19	0,58	2,9	3,0	1,8	5,9
30°	10,54	0,14	0,59	2,9	3,1	1,4	6,0
45°	10,88	0,24	0,60	2,9	3,0	2,4	6,5
60°	11,10	0,17	0,61	2,9	2,9	1,8	6,8

3.6 Pembahasan

Pada titik-titik uji, torsi stall, daya mekanik, dan C_p maksimum naik seiring sudut deflektor. Arah ini searah dengan peran deflektor yang dilaporkan peneliti lain: pada turbin Savonius hidrolik, penyebab kenaikan kinerja dikaitkan dengan sebaran tekanan dan pola aliran di sekitar sudu yang membaik [20], sedangkan pelat di depan sudu kembali meredam torsi negatif dan memudahkan rotor mulai berputar [21], [27]. Kenaikan putaran tanpa beban dan torsi stall pada penelitian ini konsisten dengan gambaran tersebut, meskipun mekanisme aliran tidak diverifikasi karena tidak ada visualisasi aliran maupun simulasi. Perbandingan dengan studi deflektor terdekat, lengkap dengan parameter geometri dan kondisi uji yang diperlukan agar perbandingan koefisien daya bermakna, disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Ringkasan studi deflektor pada turbin Savonius (ditambah parameter geometri dan kondisi uji)

Rujukan	Rotor, fluida, dan metode	Deflektor dan kondisi uji	Hasil utama
[19]	Savonius; towing tank dan CFD 2D	Deflektor belakang; jarak 0,82D	Efek terhadap C_p di bawah 3% pada jarak 0,82D
[20]	Savonius hidrolik; optimasi numerik (CFD)	Pelat deflektor tebal di depan rotor; posisi dan bentuk dioptimasi untuk luas frontal tetap; λ = 1,1 dan 1,2	C_p naik ±11% pada λ = 1,1 dan ±15% pada λ = 1,2; rotor tetap dapat mulai berputar sendiri
[21]	Savonius tiga sudu konvensional; terowongan angin 7,0 m/s (aplikasi hidrokinetik)	Dua pelat hulu; δ_A = 15°–75°, δ_R = 30°–90°	$C_{p,maks}$ 0,183 pada δ_A = 75°, δ_R = 90°; kemampuan self-starting membaik

Rujukan	Rotor, fluida, dan metode	Deflektor dan kondisi uji	Hasil utama
[22]	Savonius konvensional; angin dan air	Berbagai konfigurasi deflektor	Kinerja daya berbagai konfigurasi dibandingkan di udara dan air (parameter rinci tidak tersedia pada ringkasan yang ditelaah)
[23]	Savonius konvensional; terowongan angin, Re = $1{,}48\times10^5$ (7,0 m/s)	Dua deflektor (sudu maju dan sudu kembali); 30 kombinasi sudut	$C_{p,maks}$ 0,21, naik 61,53%; sudut deflektor sudu kembali lebih berpengaruh
[24]	Rotor hambat hidrokinetik	Deflektor hulu	Mengkaji pola aliran dan kinerja awal putaran (parameter rinci tidak tersedia pada ringkasan yang ditelaah)
[25]	Savonius heliks; air (kanal irigasi) dan simulasi	Sistem deflektor baru; enam konfigurasi	$C_{p,maks}$ 0,125 ($\lambda = 0{,}7$, tanpa deflektor) menjadi 0,14 (konfigurasi optimal)
[26]	Savonius heliks; simulasi numerik	Sistem deflektor baru; sudut dan posisi divariasikan	$C_{p,maks}$ 0,1247 menjadi 0,168 pada $\lambda = 0{,}7$
[27]	Savonius dua dan tiga sudu konvensional; terowongan angin dengan kesamaan Reynolds ke air	Satu deflektor di hulu sudu kembali; optimum $\delta = 90°$ terhadap aliran	C_p naik 84,6% (dua sudu) dan 227,3% (tiga sudu); kecepatan awal putaran lebih rendah
Penelitian ini	Savonius dua sudu, puntir 180°; udara; saluran 400 mm × 400 mm, Re ≈ $1{,}6$–$1{,}8\times10^5$; sumbatan ≈ 0,55	Satu pelat 250 mm; $\theta = 30°$–$60°$ terhadap aliran; kecepatan angin 10,07–11,10 m/s; λ pada puncak ≈ 0,08–0,09	$C_{p,maks}$ 16,29% menjadi 19,95% (22,5% relatif; ketidakpastian lebar); kecepatan angin tidak seragam

Perbedaan kecepatan angin menuntut penafsiran yang hati-hati. Pada sudut 60°, kecepatan angin 10,2% lebih tinggi daripada kondisi tanpa deflektor, sehingga daya angin yang tersedia 33,9% lebih besar. Karena daya mekanik adalah hasil kali daya angin dan C_p, kenaikan daya maksimum 64,1% secara aritmatika merupakan hasil kali faktor 1,339 (daya angin) dan faktor 1,225 (C_p). Uraian perkalian ini bukan pembagian kontribusi kausal: angka 33,9% tidak berarti sepertiga kenaikan daya turbin berasal dari angin yang lebih kuat, dan pengaruh kecepatan angin tidak dapat dipisahkan dari pengaruh deflektor pada data ini. Kenaikan C_p sebesar 22,5% secara relatif lebih dekat dengan konversi energi, tetapi tetap bergantung pada kondisi aliran yang berbeda antarkonfigurasi. Selain itu, pemasangan deflektor sendiri mungkin memengaruhi kecepatan yang terbaca pada titik ukur, sehingga pengukuran pada posisi hulu yang tetap dan seragam disarankan pada penelitian berikutnya.

Nilai C_p maksimum 16,29% tanpa deflektor dan 19,95% pada 60° berada pada orde yang sama dengan koefisien daya yang dilaporkan untuk Savonius dengan deflektor, yaitu 0,183 [21], 0,21 [23], serta 0,14 dan 0,168 pada rotor heliks [25], [26]. Perbandingan ini hanya indikatif karena rotor, fluida, bilangan Reynolds, rasio sumbatan, dan λ berbeda (Tabel 4). Kenaikan relatif C_p 22,5% berada di atas kenaikan sekitar 11–15% [20] dan sekitar 12% [25], tetapi di bawah sekitar 34% [26], 61,5% [23], dan 84,6% [27]; selisih tersebut tidak boleh dibaca sebagai

keunggulan atau kekurangan karena kondisi, geometri, kecepatan angin, dan ketidakpastian kedua studi berbeda.

Rasio kecepatan ujung pada beban yang menghasilkan daya maksimum hanya sekitar 0,08 sampai 0,09 dan pada kondisi tanpa beban sekitar 0,19 sampai 0,21, jauh lebih rendah daripada λ puncak yang dilaporkan untuk rotor Savonius heliks dan Savonius dengan deflektor (sekitar 0,65–0,7 [9], [25], [26]). Dua pemeriksaan kewajaran menunjukkan bahwa nilai absolut pada makalah ini tidak dapat dibaca sebagai koefisien aerodinamik. Pertama, torsi stall nominal 3,14–4,32 N·m setara gaya tangensial 25–35 N pada jari-jari rotor, sedangkan gaya dinamik $\frac{1}{2}\rho A v^2$ hanya 5,3–6,4 N; koefisien torsi statis setara $\tau/(\frac{1}{2}\rho A R v^2)$ menjadi sekitar 4,7–5,4, jauh di atas nilai yang umumnya dilaporkan untuk rotor Savonius (kurang dari satu). Kedua, pada daya maksimum koefisien torsi $C_t = C_p/\lambda$ bernilai 1,9–2,2, juga jauh di atas nilai yang umumnya dilaporkan. Penyebab yang mungkin mencakup gesekan tali–pulley dan bantalan yang ikut terhitung sebagai torsi, pengaruh takometer kontak pada putaran, sumbatan saluran sekitar 0,55 yang meningkatkan kecepatan lokal di sekitar rotor melebihi kecepatan yang terbaca, dan kecepatan angin terukur yang tidak mewakili aliran di rotor; penelitian ini tidak membedakan faktor-faktor tersebut. Karena skema pembebanan dan alat ukur sama untuk semua konfigurasi, perbandingan relatif antarkonfigurasi lebih dapat dipertahankan daripada nilai absolutnya, tetapi anggapan bahwa bias tersebut sama antarkonfigurasi belum diverifikasi. Pengujian dengan beban lebih kecil, putaran lebih tinggi, dan gesekan sistem yang dikarakterisasi diperlukan untuk melengkapi kurva C_p terhadap λ.

Keterbatasan penelitian ini adalah (1) kecepatan angin tidak seragam antarvariasi, anemometer berakurasi ±(5% + 0,5 m/s), dan posisi anemometer tidak tercatat, (2) setiap kurva pembebanan hanya dijalankan sekali sehingga keterulangan tidak dapat dihitung (lima pembacaan per titik hanya mengurangi galat baca), (3) torsi dihitung dari berat beban nominal tanpa karakterisasi gesekan dan tanpa dokumentasi arah gerak beban, (4) geometri deflektor, seperti panjang, tinggi, tebal, dan jaraknya terhadap rotor, tidak divariasikan, dan tinggi serta tebal pelat tidak tercatat, (5) variasi sudut berhenti pada 60° sehingga sudut optimum dapat berada di luar rentang yang diuji, (6) pengaruh sumbatan saluran (sekitar 0,55) tidak dikoreksi, (7) rentang λ yang teramati sempit, dan (8) mekanisme aliran tidak diverifikasi. Simpulan di bawah ini karenanya berlaku untuk konfigurasi dan kondisi yang diuji.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian eksploratif turbin Savonius dua sudu dengan sudut puntir 180° pada empat konfigurasi deflektor, masing-masing dengan kecepatan angin berbeda (10,07–11,10 m/s) dan satu kurva pembebanan per konfigurasi, diperoleh simpulan berikut yang hanya berlaku untuk konfigurasi dan kondisi uji ini. Hipotesis kerja bahwa torsi stall, daya mekanik, dan C_p naik seiring sudut deflektor pada rentang 30°–60° didukung arahnya oleh data (ketiganya naik secara berurutan dari 30° ke 60°), tetapi besarnya belum dapat dipastikan karena kecepatan angin tidak seragam dan kurva tidak diulang.

1. Torsi stall nominal naik dari 3,14 N·m tanpa deflektor menjadi 4,32 N·m pada 60° (naik 37,6% secara relatif), dan putaran tanpa beban naik dari 142,08 menjadi 179,28 rpm. Torsi stall berbeda dari torsi pada daya maksimum (1,37 N·m tanpa deflektor dan 1,77 N·m pada 60°) dan tidak membuktikan kemampuan self-starting, yang memerlukan pengujian torsi awal atau keberhasilan start pada beberapa posisi azimut.
2. Daya mekanik maksimum naik dari 8,68 W (10,07 m/s; daya angin 53,29 W) menjadi 14,24 W (11,10 m/s; 71,37 W) pada 60°, yaitu 64,1% secara relatif, dengan putaran 77,05 rpm dan beban 9 kg. Daya angin yang tersedia pada 60° sendiri 33,9% lebih besar, dan pengaruh kecepatan angin tidak dapat dipisahkan dari pengaruh deflektor.

3. C_p maksimum naik dari 16,29% menjadi 19,95% (3,66 poin persentase atau 22,5% secara relatif). Perubahan ini belum dapat sepenuhnya diatribusikan pada sudut deflektor karena kondisi aliran dan prosedur pengukuran tidak dikendalikan setara; selisih pada 60° terpisah dari ketidakpastian acak (k = 2), sedangkan pada 30° dan 45° tidak. Sudut 60° memberikan nilai tertinggi di antara titik yang diuji tetapi belum menunjukkan sudut optimum.
4. Rasio kecepatan ujung pada puncak daya hanya sekitar 0,08–0,09 dan koefisien torsi setara jauh di atas nilai yang umum dilaporkan; hasil absolut sebaiknya dibaca sebagai indikator relatif antarkonfigurasi sampai skema pembebanan diverifikasi.

5. SARAN

Penelitian lanjutan sebaiknya (1) menyamakan atau mengendalikan kecepatan angin pada setiap variasi serta mengukurnya di posisi hulu yang tetap, (2) mengulang setiap kurva pembebanan minimal tiga kali dan melaporkan ketidakpastian, (3) mengkalibrasi torsi dengan torsi acuan dan mengkarakterisasi gesekan tali–pulley dan bantalan, (4) menguji torsi awal pada beberapa posisi azimut untuk menilai self-starting, (5) memperluas variasi sudut melewati 60°, memvariasikan geometri serta jarak deflektor, dan mengoreksi sumbatan, (6) melengkapi kurva C_p terhadap λ pada rentang putaran yang lebih luas, dan (7) memakai visualisasi aliran atau simulasi CFD untuk menjelaskan mekanisme peningkatan kinerja serta menguji pada angin rendah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium ATI Makassar yang telah menyediakan fasilitas pengujian serta kepada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pejuang Republik Indonesia atas dukungan yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] L. H. Abdurrahman, “Studi pembangkit listrik tenaga angin ditinjau dari aspek pembangkitan energi listrik,” *JuTEkS (J. Tek. Elektro dan Sains)*, vol. 5, no. 2, 2018, doi: 10.32832/juteks.v5i2.13490.

[2] R. Kumar, K. Raahemifar, and A. S. Fung, “A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 89, pp. 281–291, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.033.

[3] M. Mohammadi, R. Mohammadi, A. Ramadan, and M. H. Mohamed, “Numerical investigation of performance refinement of a drag wind rotor using flow augmentation and momentum exchange optimization,” *Energy*, vol. 158, pp. 592–606, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.072.

[4] A. Ramadan, K. Yousef, M. Said, and M. H. Mohamed, “Shape optimization and experimental validation of a drag vertical axis wind turbine,” *Energy*, vol. 151, pp. 839–853, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.03.117.

[5] S. N. Gomes, W. Mursanto, and B. Suharto, “Pembuatan dan pengujian turbin angin Savonius tipe-U 4 sudu sumbu vertikal,” *J. Tek. Energi*, vol. 12, no. 2, pp. 8–16, 2023.

[6] W. Junior, S. Tangkuman, and T. Arungpadang, “Perancangan rotor turbin angin Savonius tipe-L untuk pembangkit listrik pada rumah tinggal,” *J. Poros Tek. Mesin Unsrat*, vol. 11, no. 1, 2022. [Online]. Available: https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/poros/article/view/43110

[7] S. Sudirman, A. S. Kurniati, and M. I. A. Arifin, “Analisis pembangkit listrik menggunakan turbin angin Savonius,” *J. Media Elektro*, pp. 29–36, 2020.

[8] J. Simanjuntak, S. Tangkuman, and I. Rondonuwu, "Simulasi pengaruh jumlah dan panjang sudu terhadap daya turbin angin tipe poros horisontal," *J. Poros Tek. Mesin Unsrat*, vol. 10, no. 1, 2021. [Online]. Available: https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/poros/article/view/34765

[9] L. B. Kothe, S. V. Möller, and A. P. Petry, "Numerical and experimental study of a helical Savonius wind turbine and a comparison with a two-stage Savonius turbine," *Renew. Energy*, vol. 148, pp. 627–638, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.151.

[10] A. Pérez-Terrazo, M. Moreno, I. Trejo-Zúñiga, and J. A. López, "A two-stage twisted blade μ-vertical axis wind turbine: An enhanced Savonius rotor design," *Energies*, vol. 17, no. 12, Art. no. 2835, Jun. 2024, doi: 10.3390/en17122835.

[11] T. Purbaya, A. Jannifar, and S. Bahri, "Rancang bangun twist blade kincir angin vertikal axis wind turbin model Savonius dengan variasi tertutup dan terbuka," *J. Mesin Sains Terapan*, vol. 5, no. 2, pp. 65–70, 2021.

[12] C. M. Chan, H. L. Bai, and D. Q. He, "Blade shape optimization of the Savonius wind turbine using a genetic algorithm," *Appl. Energy*, vol. 213, pp. 148–157, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.01.029.

[13] M. Mohammadi, M. Lakestani, and M. H. Mohamed, "Intelligent parameter optimization of Savonius rotor using artificial neural network and genetic algorithm," *Energy*, vol. 143, pp. 56–68, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.10.121.

[14] A. A. Noman, Z. Tasneem, M. F. Sahed, S. M. Muyeen, S. K. Das, and F. Alam, "Towards next generation Savonius wind turbine: Artificial intelligence in blade design trends and framework," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 168, Art. no. 112531, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112531.

[15] J. Michna and K. Rogowski, "CFD calculations of average flow parameters around the rotor of a Savonius wind turbine," *Energies*, vol. 16, no. 1, Art. no. 281, Dec. 2022, doi: 10.3390/en16010281.

[16] N. Alom and U. K. Saha, "Performance evaluation of vent-augmented elliptical-bladed Savonius rotors by numerical simulation and wind tunnel experiments," *Energy*, vol. 152, pp. 277–290, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.03.136.

[17] S. Montelpare, V. D'Alessandro, A. Zoppi, and R. Ricci, "Experimental study on a modified Savonius wind rotor for street lighting systems. Analysis of external appendages and elements," *Energy*, vol. 144, pp. 146–158, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.017.

[18] C. Kang, W. Opare, C. Pan, and Z. Zou, "Upstream flow control for the Savonius rotor under various operation conditions," *Energies*, vol. 11, no. 6, Art. no. 1482, Jun. 2018, doi: 10.3390/en11061482.

[19] F. Guo, B. Song, Z. Mao, and W. Tian, "Experimental and numerical validation of the influence on Savonius turbine caused by rear deflector," *Energy*, vol. 196, Art. no. 117132, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117132.

[20] E. Kerikous and D. Thévenin, "Optimal shape and position of a thick deflector plate in front of a hydraulic Savonius turbine," *Energy*, vol. 189, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116157.

[21] M. B. Salleh, N. M. Kamaruddin, Z. Mohamed-Kassim, and E. A. Bakar, "Experimental investigation on the characterization of self-starting capability of a 3-bladed Savonius hydrokinetic turbine using deflector plates," *Ocean Eng.*, vol. 228, Art. no. 108950, May 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108950.

[22] M. B. Salleh, N. M. Kamaruddin, P. H. Tion, and Z. Mohamed-Kassim, "Comparison of the power performance of a conventional Savonius turbine with various deflector configurations in wind and water," *Energy Convers. Manag.*, vol. 247, Art. no. 114726, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114726.

[23] M. B. Salleh, N. M. Kamaruddin, and Z. Mohamed-Kassim, "Experimental investigation on the effects of deflector angles on the power performance of a Savonius turbine for

hydrokinetic applications in small rivers," *Energy*, vol. 247, Art. no. 123432, May 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123432.

[24] C. Kang, H. Zhao, Y. Zhang, and K. Ding, "Effects of upstream deflector on flow characteristics and startup performance of a drag-type hydrokinetic rotor," *Renew. Energy*, vol. 172, pp. 290–303, 2021.

[25] M. Mosbahi, A. Ayadi, Y. Chouaibi, Z. Driss, and T. Tucciarelli, "Performance study of a Helical Savonius hydrokinetic turbine with a new deflector system design," *Energy Convers. Manag.*, vol. 194, pp. 55–74, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.04.080.

[26] A. Ayadi, M. Mosbahi, H. Nasraoui, and Z. Driss, "Investigation of a helical Savonius turbine with a deflector system," *Ocean Eng.*, vol. 286, Art. no. 115655, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115655.

[27] M. B. Salleh, N. M. Kamaruddin, and Z. Mohamed-Kassim, "The effects of a deflector on the self-starting speed and power performance of 2-bladed and 3-bladed Savonius rotors for hydrokinetic application," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 61, pp. 168–180, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.esd.2021.02.005.

[28] A. Lolok, L. K. Mangalla, and B. A. Badia, "Effect of blade number on the performance of an H-rotor vertical axis wind turbine under low wind speed conditions," *Jurnal Polimesin*, vol. 24, no. 2, 2026, doi: 10.30811/jpl.v24i2.8832.

[29] Aji, A. A., Badia, B. A., Putra, M. I., Putra, F. C., Sahputra, W. P., Darwis, M., & Simanjuntak, R. A. H., "Optimasi Parameter Pembubutan Baja AISI 1045 Menggunakan Metode Taguchi," Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi, vol. 11, no. 2, pp. 247-257, Oct. 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i2.13719.

[30] Erdani, Y., Fahrurozi, A., Suhada, M. G., Hidayatullah, C. T., Naufal, M., & Badia, B. A., "Analisis Dampak Kesalahan Penyetelan Screw Adjusting terhadap Kinerja Kelistrikan Horn Kendaraan," Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi, vol. 11, no. 2, pp. 288-295, Oct. 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i2.13774.

[31] Asiri, M. H., Husen, M., Badia, B. A., & Syafrun, M., "Studi Kekuatan Sambungan Las Terhadap Material Baja TRS 500 Menggunakan Variasi Gerakan Elektroda," Jurnal Polimesin, vol. 18, no. 2, pp. 82-90, 2020. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v18i2.1828

[32] Badia, B. A., Asiri, M. H., & Husen, M., "Analisa Variasi Gerakan Elektroda pada Hasil Las Bahan Baja Karbon Rendah (ST37) Terhadap Sifat Mekanik," Jurnal Po-limesin, vol. 19, no. 1, pp. 53-60, 2021. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v19i1.1912.

[33] Badia, B. A., Sudia, B., Mangalla, L. K., Gunawan, Y., Aksar, P., Samhuddin, S., Putra, M. I., Larobu, F. E., Darwin, D., Efendi, R., Defi, S., Gamsir, L. O. A., & Darwis, M., "Analisis Pengaruh Komposisi Perekat Terhadap Karakteristik Termal Briket Arang Pelepah Sagu Sebagai Bahan Bakar Alternatif," Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi, vol. 10, no. 1, pp. 38-44, 2024. [Online]. Avail-able: https://doi.org/10.35308/jmkn.v10i1.9208.

[34] Nuryanti, N., Erdani, Y., Subekti, R., Purnomo, W., Indrajaya, N., & Badia, B. A., "Tracking Solar Panel Maximum Power Point Using IoT-Based Mamdani Fuzzy Log-ic Control," Jurnal Polimesin, vol. 23, no. 5, pp. 703-710, 2025. [Online]. Availa-ble: http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v23i5.7709.

[35] Aji, A. A., Cesar Putra, F., Badia, B. A., Idris Putra, M., Sahputra, W. P., Darwis, M., & Hasudungan Simanjuntak, R. A. (2025). Analysis Of The Effect Of Machining Variables On Surface Roughness and Vibration Amplitude in Turning AlSi 1045 Steel Using The Taguchi Method. PHENOMENON : Multidisciplinary Journal Of Sciences and Research, 3(01), 53–62. https://doi.org/10.62668/phenomenon.v3i1.1406

[36] W. P. Sahputra, B. A. Badia, M. I. Putra, F. C. Putra, and A. A. Aji, "Rekayasa Pros-es Ekstraksi dan Pengelolahan Biji Nikel: Teknologi, Tantangan, Dan Prospek Masa Depan", Kapalamada, vol. 4, no. 02, pp. 243–255, Jun. 2025.

[37] Y. Erdani, R. A. Pratama, B. A. Badia, and G. I. Fadila, "Desain Sistem Kontrol Container Station Menggunakan Metode Waterfall Berbasis Internet of Things (IoT)", G-Tech, vol. 8, no. 3, pp. 1415–1430, Jul. 2024.

[38] R. A. H. Simanjuntak, M. Darwis, R. Utami, B. A. Badia, and F. C. Putra, "A systematic review of manual and equipment-based demolition techniques for low-rise buildings: Technical performance, safety implications, and method selection criteria," Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi, vol. 12, no. 1, 2026. [Online]. Available: http://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/15217

[39] J. Jumhur and B. A. Badia, "Analisis kinerja metode charging–discharging berbasis Arduino untuk pengukuran resistansi sensor elastis," Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi, vol. 12, no. 1, 2026. [Online]. Available: http://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/15167

[40] M. H. Asiri and B.A. Badia, "INVESTIGATION OF HARDNESS AND MICROSTRUCTURE IN Al+Sn POWDER ALLOY COMPOSITES REINFORCED WITH RESIN", JET, vol. 1, no. 1, pp. 1–11, Apr. 2026, Accessed: Oct. 14, 2026. [Online].

[41] B. A. Badia and C.Y. Syah, "MATERIAL ENGINEERING IN THE FABRICATION OF CHARCOAL BRIQUETTES FROM SAGO TREE WASTE: PHYSICAL CHARACTERISTICS AND COMBUSTION PERFORMANCE EVALUATION", JET, vol. 1, no. 1, pp. 24–35, Apr. 2026, Accessed: Oct. 14, 2026. [Online].

[42] A. Kadir, B. A. Badia, M. I. Putra, and C. Y. Syah, "Perancangan dan analisis struktural belt konveyor mesin pengayak pasir tipe rotary berbasis simulasi Autodesk Inventor untuk meningkatkan produktivitas," Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi, vol. 12, no. 1, 2026. [Online]. Available: http://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/14861

[43] B. A. Badia, M. H. Asiri, P. Aksar, and J. S. D. Saputra, "Inovasi material: Meningkatkan kualitas aluminium (Al) limbah piston daur ulang dengan penambahan timah (Sn) dengan proses pengecoran ulang," Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi, vol. 10, no. 2, 2024. [Online]. Available: http://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/10504

[44] F. E. Larobu, Y. Erdani, B. A. Badia, and L. O. M. F. Rachim, "Rancang Bangun PLTMH Skala Kecil Dengan Sistem On-Grid Untuk Respons Dinamis Terhadap Pe-rubahan Beban Listrik", Kapalamada, vol. 4, no. 01, pp. 07–18, Mar. 2025.

[45] A. Kadir and B. A. Badia, "Rancang Bangun Belt Konveyor Rotary Untuk Penga-yakan Pasir", Kapalamada, vol. 4, no. 04, pp. 755–766, Dec. 2025

[46] Badia, B. A., Delly, J., Ardiansal, M., & Rahmatullah, P., "Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Pengiris Bawang Merah Otomatis Berbasis Motor Listrik untuk Mening-katkan Produktivitas UMKM", Jurnal Teknologi Terapan (JTT), vol. 12, no. 1, pp. 84-94, 2026. https://doi.org/10.31884/jtt.v12i1.1294

[47] S. Defi, L. Pagiling, M. N. A. Nur, F. E. Larobu, A. Jalil, and B. A. Badia, "Rancang bangun prototipe sistem kontrol automatic main failure (AMF) menggunakan SMS (Short Message Service) berbasis PLC (Programmable Logic Controller)," Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi, vol. 10, no. 1, pp. 75–87, 2024. doi: https://doi.org/10.12345/jmekanova.v10i1.75-87

[48] R. Efendi, D. Darwin, B. A. Badia, A. Tando, H. Herlina, and W. L. Padang, "Rancang bangun termokopel data logger berbasis Arduino Mega 2560 skala labora-torium," Machine: Jurnal Teknik Mesin, vol. 9, no. 2, pp. 15–19, 2023. doi: https://doi.org/10.xxxxx/machine.v9i2.15-19.

[49] E. Wardani, E. Rambak, L. Rahman, B. Badia, and M. Muchlisin, "Analyzing the modal shift from private vehicles to bicycles through the stated preference method: A case study of bicycle lane planning at Universitas Muhammadiyah Yogyakarta," *SCiEJ*, vol. 6, no. 1, pp. 479–489, Apr. 2025.

[50] F. C. Putra, B. A. Badia, S. Samhuddin, M. I. Putra, C. Y. Syah, and R. A. H. Simanjuntak, "Optimasi parameter injection moulding terhadap penyimpangan volume gantungan

pakaian polipropilena menggunakan metode Taguchi," *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 12, no. 2, Oct. 2026. [Online]. Available: http://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/16468

[51] B. A. Badia, L. Hasanuddin, S. Samhuddin, M. I. Putra, C. Y. Syah, D. Al-Fahri, R. Rohid, and A. Andri, "Rancang bangun dan uji kinerja mesin pengurai sabut kelapa skala kecil penghasil cocopeat dan cocofiber," *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 12, no. 2, Oct. 2026. [Online]. Available: http://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/16439.