Rancang Bangun Pompa Ulir Vertikal dengan Penggerak Kincir Angin Savonius

Megajaya Salma Ariansyah[1*], Muhammad Daffa Mu'arif[1], Sujono[1]

[1]Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu, Blora, Jawa Tengah 58315, Indonesia

ABSTRAK

Keterbatasan sistem irigasi konvensional berbahan bakar fosil menjadi permasalahan serius bagi petani lahan sawah tadah hujan, khususnya di Kecamatan Cepu, Kabupaten Blora, Jawa Tengah, terutama saat debit air parit menyusut dan posisinya lebih rendah daripada lahan pertanian. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji kinerja prototipe pompa *screw* (ulir Archimedes) vertikal berbasis energi kincir angin Savonius sebagai solusi irigasi mandiri energi yang ramah lingkungan. Metode yang digunakan meliputi studi literatur komponen sistem, perancangan prototipe skala menengah dengan variasi 11, 12, 13, dan 14 sudu pompa, serta pengujian karakteristik komponen turbin dan pompa secara terpisah untuk menganalisis parameter daya, kecepatan angin, putaran poros, debit, dan efisiensi. Hasil pengujian menunjukkan turbin angin Savonius beroperasi pada kecepatan angin 2,5–5,7 m/s yang dihasilkan kipas angin, dengan putaran maksimum 162,5 rpm pada 5,7 m/s, daya angin pada luas sudu turbin 34,96 watt, dan torsi ekuivalen terhitung 2,05 N·m. Pompa ulir dengan konfigurasi 14 sudu menghasilkan performa terbaik dengan efisiensi tertinggi 5,08% pada putaran 1000 rpm dan bukaan katup 75%. Meskipun terjadi ketidaksesuaian karakteristik torsi antara turbin dan beban pompa sehingga putaran kincir belum mencapai ambang kerja minimal pompa sebesar 400 rpm, hasil ini membuktikan potensi teknologi pompa ulir bertenaga angin sebagai alternatif irigasi mandiri energi skala kecil, dengan peluang optimalisasi lanjutan pada sistem transmisi daya.

Kata Kunci: Energi terbarukan, Irigasi pertanian, Kincir angin Savonius, Pompa *screw*, Ulir Archimedes

daffamrf302@gmail.com

1. Pendahuluan

Sektor pertanian merupakan tulang punggung ketahanan pangan nasional, namun ketersediaan air irigasi yang tidak merata menjadi tantangan utama yang dihadapi petani hingga saat ini. Lahan sawah tadah hujan sangat rentan terhadap dampak perubahan iklim, terutama keterbatasan akses air irigasi yang secara langsung menurunkan produktivitas hasil panen [1]. Kondisi ini diperparah dengan rendahnya produktivitas padi pada lahan tadah hujan yang berkisar antara 1,8 hingga 3,5 ton per hektar, jauh di bawah potensi optimal yang seharusnya dapat dicapai [2]. Permasalahan ini sangat dirasakan oleh petani di Kecamatan Cepu, Kabupaten Blora, Jawa Tengah, yang sebagian besar lahan pertaniannya merupakan sawah tadah hujan dengan curah hujan rendah dan sumber air (parit) yang letaknya lebih rendah daripada lahan pertanian, sehingga dibutuhkan alat untuk memindahkan air dari parit tersebut menuju lahan pengairan.

Solusi irigasi yang umum digunakan petani saat ini masih mengandalkan pompa berbahan bakar minyak (BBM) yang biayanya terus meningkat, di mana untuk satu petak sawah seluas 30–35 are dibutuhkan sekitar 8 liter BBM dengan waktu operasional rata-rata 10 jam [3]. Kondisi ini menyebabkan banyak lahan tadah hujan tidak dikelola secara optimal saat musim kemarau tiba. Di sisi lain, potensi energi angin di wilayah pesisir Jawa Tengah sesungguhnya cukup menjanjikan, namun belum dimanfaatkan secara optimal, dengan kecepatan angin berkisar 2,5–7 m/s yang bertiup sepanjang hari mulai pukul 08.00 hingga 16.00 sehingga sangat memungkinkan dimanfaatkan sebagai penggerak pompa irigasi [4].

Merespons permasalahan tersebut, teknologi pompa *screw* (ulir Archimedes) berbasis kincir angin hadir sebagai solusi yang tepat guna dan berkelanjutan. Pompa ulir Archimedes bekerja dengan prinsip sederhana, yakni memanfaatkan putaran tabung berulir yang dipasang miring untuk mengangkat air tanpa memerlukan sumber listrik sama sekali [5], dan telah terbukti digunakan secara luas pada fasilitas irigasi karena kemampuannya mengangkat air dari tempat rendah ke tempat yang lebih tinggi secara efisien [6]. Penelitian Taba dan Bedes mengenai pemanfaatan kincir angin Savonius untuk penggerak pompa sirkulasi air menunjukkan bahwa kincir tipe Savonius mampu beroperasi pada kecepatan angin terendah 3,3–6 m/s dan berhasil menggerakkan pompa sentrifugal untuk kebutuhan tambak ikan [7]. Penelitian Muhfidin dan Hartana tentang rancang bangun sistem penggerak pompa air menggunakan kincir angin untuk pengairan lahan pasir turut membuktikan kelayakan kincir angin sebagai penggerak pompa irigasi langsung tanpa sumber energi tambahan [8]. Sementara itu, penelitian Arham dkk. tentang turbin Archimedes *screw* dengan variasi jumlah sudu menunjukkan bahwa jumlah sudu merupakan parameter internal yang signifikan dalam mengoptimalkan kinerja sistem, sedangkan sudut kemiringan poros dan debit air merupakan parameter eksternal yang turut memengaruhi efisiensi [9]. Dari sisi penggerak, kinerja turbin tipe Savonius telah banyak dikaji, antara lain melalui investigasi numerik pada konfigurasi hidrokinetik [10], dan pemanfaatan turbin angin untuk menggerakkan beban mekanis secara langsung, seperti kompresor aerasi tambak udang, juga telah dilaporkan [11].

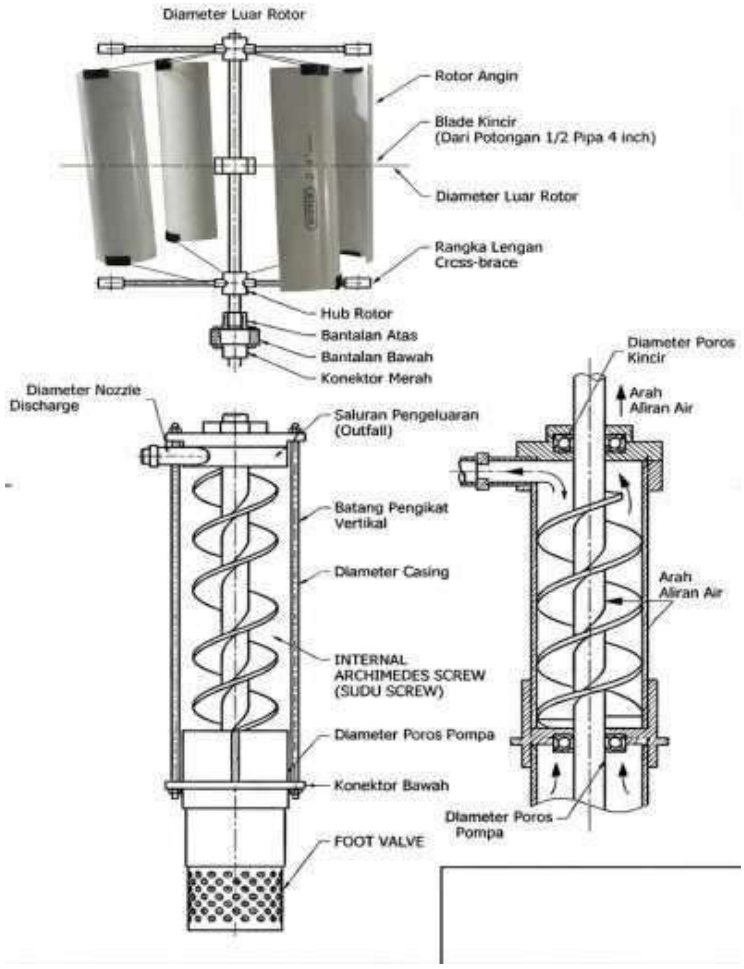
Berdasarkan kajian penelitian terdahulu, belum ditemukan penelitian yang secara spesifik mengintegrasikan kincir angin tipe Savonius vertikal dengan pompa *screw* ulir Archimedes vertikal untuk kebutuhan irigasi pertanian sekaligus mengkaji pengaruh variasi jumlah sudu pompa terhadap kinerja hidroliknya. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) merancang dan membangun pompa *screw* sederhana berbasis energi kincir angin Savonius sebagai solusi irigasi pertanian di Kecamatan Cepu, Kabupaten Blora; (2) menganalisis secara eksperimental kinerja sistem meliputi putaran poros, debit air, dan kesesuaian (*matching*) daya hulu-hilir; serta (3) menganalisis pengaruh variasi jumlah sudu (11, 12, 13, dan 14 sudu) pada pompa *screw* terhadap debit, efisiensi, dan kemampuan tinggi angkat untuk aplikasi irigasi sawah tadah hujan.

Selain aspek teknis, penelitian ini juga sejalan dengan agenda transisi energi nasional menuju *Net Zero Emission* (NZE) melalui pemanfaatan energi angin sebagai sumber penggerak yang bersih dan berkelanjutan, sekaligus berpotensi menjadi modul praktikum mata kuliah Mesin Fluida dan Energi Terbarukan di lingkungan pendidikan vokasi. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada pengukuran kinerja pompa ulir vertikal yang digerakkan simulasi putaran terkontrol untuk pemetaan karakteristik hidrolik, serta pengujian kincir angin Savonius menggunakan kipas angin sebagai sumber angin, tanpa melibatkan catu daya listrik PLN sebagai sumber energi pembanding. Susunan pembahasan pada artikel ini meliputi metode perancangan dan pengujian, hasil perancangan dimensi komponen, karakteristik performa hidrolik pompa ulir pada empat variasi jumlah sudu, karakteristik kincir angin Savonius, serta analisis kesesuaian daya (*matching*) antara turbin penggerak dan beban pompa.

2. Metodologi

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh melalui tahapan sistematis meliputi studi literatur, perancangan alat, pembuatan prototipe, dan pengujian langsung. Studi literatur dilakukan dengan mengkaji jurnal ilmiah terkait prinsip kerja pompa *screw* (ulir Archimedes), mekanisme kincir angin, dan sistem irigasi pertanian. Pengujian alat dilakukan secara terkontrol dengan mengukur debit air, putaran poros minimum yang diperlukan untuk menggerakkan sistem, serta efisiensi pemompaan. Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis secara deskriptif-kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja alat dan kelayakannya sebagai solusi irigasi mandiri energi.

Sistem yang dirancang merupakan pompa *screw* sederhana berbasis kincir angin tipe Savonius poros vertikal 4 sudu yang berfungsi sebagai alat irigasi ramah lingkungan. Tipe Savonius dipilih karena kemampuannya menangkap angin dari segala arah tanpa perlu menghadap satu arah tertentu, sehingga cocok digunakan pada berbagai kondisi lapangan. Energi rotasi yang dihasilkan kincir angin diteruskan melalui poros aluminium dan *bearing* menuju pompa *screw* sehingga air dapat terangkat dari sumber menuju lahan pertanian. Komponen pompa *screw*, *nozzle* keluaran, dan tutup bawah dicetak menggunakan teknologi *3D printing* berbahan filamen *Polylactic Acid* (PLA), sedangkan *casing* menggunakan pipa PVC 4" dan bilah kincir dibuat dari material PVC yang dibentuk sesuai profil Savonius vertikal. Skema rangkaian pengujian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skematik Desain Sistem Pompa Ulir dan Kincir Angin Savonius

Perhitungan performa turbin angin mengacu pada persamaan daya kinetik angin [12] yang melintasi luas sudu turbin (Pers. 1), dengan ρ adalah densitas udara (kg/m^3), A luas sudu turbin (m^2), dan V kecepatan angin (m/s):

$$P_{in} = 0{,}5 \cdot \rho_{udara} \cdot A \cdot V^3 \quad (1)$$

Torsi ekuivalen turbin (T) dihitung dari daya angin (P_{in}) dan kecepatan sudut ($\omega = 2\pi n/60$) dengan asumsi seluruh daya angin terserap rotor (Pers. 2), sehingga bukan hasil pengukuran langsung pada poros, sedangkan efisiensi hidrolik pompa (η) merupakan perbandingan daya hidrolik neto (N_h) yang diterima fluida terhadap daya poros aktual pompa (N_p), sebagaimana Pers. 3:

$$T = P_{in} / \omega \quad (2)$$

$$\eta = (N_h / N_p) \times 100\% \quad (3)$$

dengan $N_h = \rho_{air} \cdot g \cdot Q \cdot H$ [13], di mana Q adalah debit aktual (m^3/s) dan H adalah *head* total pompa (m) yang terukur pada *pressure gauge*. Rasio diameter rotor pompa ($\sigma = D_i/D_o$) dan jumlah sudu heliks digunakan untuk menentukan jarak antar-sudu (*pitch*, S) serta sudut sudu masuk (β) dan sudu keluar (α), mengikuti pendekatan geometri ulir Archimedes [14], [15].

Pemilihan variasi jumlah sudu 11, 12, 13, dan 14 didasarkan pada beberapa pertimbangan. Pertama, jumlah sudu dan *pitch* merupakan parameter internal yang dapat dipilih untuk mengoptimalkan kinerja pompa ulir [15], dan jumlah sudu dilaporkan sebagai parameter internal yang signifikan [9]. Kedua, karena panjang aktif rotor (L = 40 cm) dan diameter *casing* dijaga tetap, jumlah sudu (N) menentukan *pitch* secara langsung menurut S ≈ L/N, sehingga rentang 11–14 sudu menghasilkan *pitch* 2,85–3,63 cm atau rasio S/D_o sekitar 0,26–0,33 (Tabel 1). Ketiga, jumlah sudu dinaikkan satu per satu, baik ganjil maupun genap, sehingga perubahan *pitch* antarvariasi relatif kecil (sekitar 0,22–0,30 cm) dan pengaruh jumlah sudu dapat diamati secara bertahap, termasuk apabila tren yang muncul tidak monoton. Keempat, setiap variasi memerlukan rotor cetak 3D tersendiri yang diuji pada 16 kombinasi putaran dan bukaan katup, sehingga cakupan penelitian dibatasi pada empat variasi. Rentang jumlah sudu yang lebih lebar tidak dicakup dalam penelitian ini dan menjadi saran untuk penelitian lanjutan.

Pengujian eksperimental dilakukan dalam dua tahap terpisah. Tahap pertama menguji karakteristik hidrolik pompa ulir pada rentang putaran poros 400–1000 rpm (disimulasikan menggunakan bor listrik dan *dimmer*) untuk empat variasi jumlah sudu (11, 12, 13, dan 14 sudu) pada empat variasi bukaan *gate valve* (25%, 50%, 75%, dan 100%), dengan parameter ukur berupa debit (*flow meter*), *head* (*pressure gauge*), dan daya poros (volt-ampere meter). Tahap kedua menguji karakteristik kincir angin Savonius 4 sudu menggunakan kipas angin sebagai sumber angin, dengan parameter ukur berupa kecepatan angin dan putaran poros, sedangkan daya angin dan torsi dihitung berdasarkan persamaan. Daftar alat dan bahan utama penelitian dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Geometri Sudu Pompa Ulir

Parameter Geometri	11 Sudu	12 Sudu	13 Sudu	14 Sudu
Pitch, S (cm)	3,63	3,33	3,07	2,85
Sudut sudu masuk, β (°)	78,11	79,08	79,88	80,61
Sudut sudu keluar, α (°)	83,99	84,47	84,90	85,27

Tabel 2. Alat dan Bahan Utama Penelitian

Alat/Bahan	Fungsi	Spesifikasi
Volt Ampere Meter	Mengukur tegangan dan arus listrik	AC/DC, 0–500V / 0–100A
Flow meter	Mengukur debit air keluaran pompa	Analog, satuan m^3, 1/2"

Alat/Bahan	Fungsi	Spesifikasi
Pressure gauge	Mengukur tekanan (*head*) sistem pemompaan	Rentang 0–10 bar
Gate valve	Mengatur bukaan aliran air pengujian	PVC, diameter 1"
Bor listrik + *dimmer*	Simulasi putaran poros kincir angin	800 W / 2000 W, 220 V AC
Tachometer	Mengukur putaran poros	Digital
Anemometer	Mengukur kecepatan angin	Digital
Printer 3D (Creality K1)	Mencetak *screw*, *nozzle*, tutup bawah	Filamen PLA, Ø 1,75 mm
Casing pompa	Selubung pelindung & saluran aliran	Pipa PVC Ø 4"
Screw ulir Archimedes	Mekanisme pemompaan air	Cetak 3D, variasi 11/12/13/14 sudu
Bilah kincir Savonius	Menangkap energi angin	PVC, profil Savonius vertikal, 4 sudu
Poros & *bearing*	Meneruskan energi rotasi ke pompa	Aluminium pejal + *ball bearing*
Foot valve (tusen klep)	Katup satu arah pencegah aliran balik	PVC, diameter 1"

Prosedur pengujian hidrolik pompa ulir dilaksanakan dengan tahapan sebagai berikut: (1) rotor *screw* dipasang pada *casing* PVC dan dikopel dengan poros penggerak bor listrik yang kecepatannya diatur menggunakan *dimmer* hingga mencapai putaran target (400, 600, 800, atau 1000 rpm) yang dipantau menggunakan *tachometer*; (2) katup keluaran (*gate valve*) diatur pada bukaan 100%, 75%, 50%, dan 25% secara berurutan untuk setiap putaran; (3) pada setiap kombinasi putaran dan bukaan katup, debit air dicatat melalui *flow meter* setelah kondisi aliran stabil, sedangkan tekanan (*head*) dicatat melalui *pressure gauge* yang terpasang pada saluran keluaran; (4) arus dan tegangan input motor penggerak dicatat melalui volt ampere meter untuk menghitung daya poros aktual; dan (5) seluruh pengukuran diulang sebanyak tiga kali pada setiap titik uji untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif dan meminimalkan kesalahan pembacaan alat ukur. Prosedur yang identik diterapkan pada keempat variasi jumlah sudu (11, 12, 13, dan 14 sudu) dengan seluruh parameter operasi lain dijaga tetap konstan (panjang aktif rotor 40 cm dan diameter *casing* 4") agar perbandingan performa hanya dipengaruhi oleh variabel jumlah sudu. Pengujian karakteristik kincir angin Savonius dilakukan secara terpisah menggunakan kipas angin sebagai sumber angin, dengan kecepatan angin diukur menggunakan anemometer dan putaran poros dicatat menggunakan *tachometer* pada enam titik kecepatan angin yang berbeda, sedangkan daya angin dan torsi ekuivalen turbin dihitung menggunakan Pers. 1 dan Pers. 2.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Perancangan Dimensi Komponen

Rancang bangun sistem pemompaan vertikal ini mengintegrasikan dua komponen utama, yaitu pompa ulir Archimedes vertikal sebagai beban hulu dan turbin angin Savonius 4 sudu sebagai penggerak mula (*prime mover*). Berdasarkan rujukan desain teoritis, rasio diameter (σ) ditetapkan sebesar 0,5 yang diperoleh dari perbandingan diameter poros inti (D_i = 54,5 mm) terhadap diameter luar rotor (D_o = 109 mm), disesuaikan dengan diameter dalam *casing* pipa PVC 4" sebesar 110 mm sehingga menyisakan celah toleransi (*clearance gap*) sebesar 0,5 mm pada setiap sisi. Variasi jumlah sudu 11, 12, 13, dan 14 diterapkan pada panjang aktif rotor yang seragam sepanjang 40 cm. Hasil perhitungan geometri sudu dirangkum pada Tabel 1.

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa penambahan jumlah sudu menyebabkan *pitch* (S) semakin menyempit, sedangkan sudut masuk (β) dan sudut keluar (α) semakin membesar mendekati posisi vertikal. Struktur sudut yang semakin curam ini secara mekanis berfungsi memaksimalkan luas ruang jebakan sekat air sehingga fluida dapat didorong ke atas melawan gravitasi secara kontinu di dalam *casing*. Sebagai penggerak mula, dimensi kincir Savonius dirancang dengan tinggi vertikal sudu 0,4 m dan diameter sudu 0,122 m (≈4,8 inci) untuk 4 sudu, menghasilkan luas sudu turbin (A) sebesar 0,306 m^2. Pada kondisi angin desain maksimum 3 m/s dan densitas udara 1,23 kg/m^3, total potensi daya angin pada luas sudu tersebut dihitung sebesar 5,10 watt.

3.2 Karakteristik Performa Hidrolik Pompa Ulir

Pengujian hidrolik dilakukan pada rentang putaran 400–1000 rpm untuk memetakan karakteristik performa setiap konfigurasi sudu. Rekapitulasi hasil pengujian pada kondisi operasi tertinggi (1000 rpm) untuk keempat konfigurasi disajikan pada Tabel 3, sedangkan kurva performa hidrolik salah satu konfigurasi (11 sudu) pada seluruh rentang putaran ditampilkan pada Gambar 2 sebagai representasi tren umum *head*, efisiensi, dan daya terhadap kapasitas debit. Perbandingan langsung efisiensi dan *head* keempat konfigurasi pada 1000 rpm disajikan pada Gambar 3.

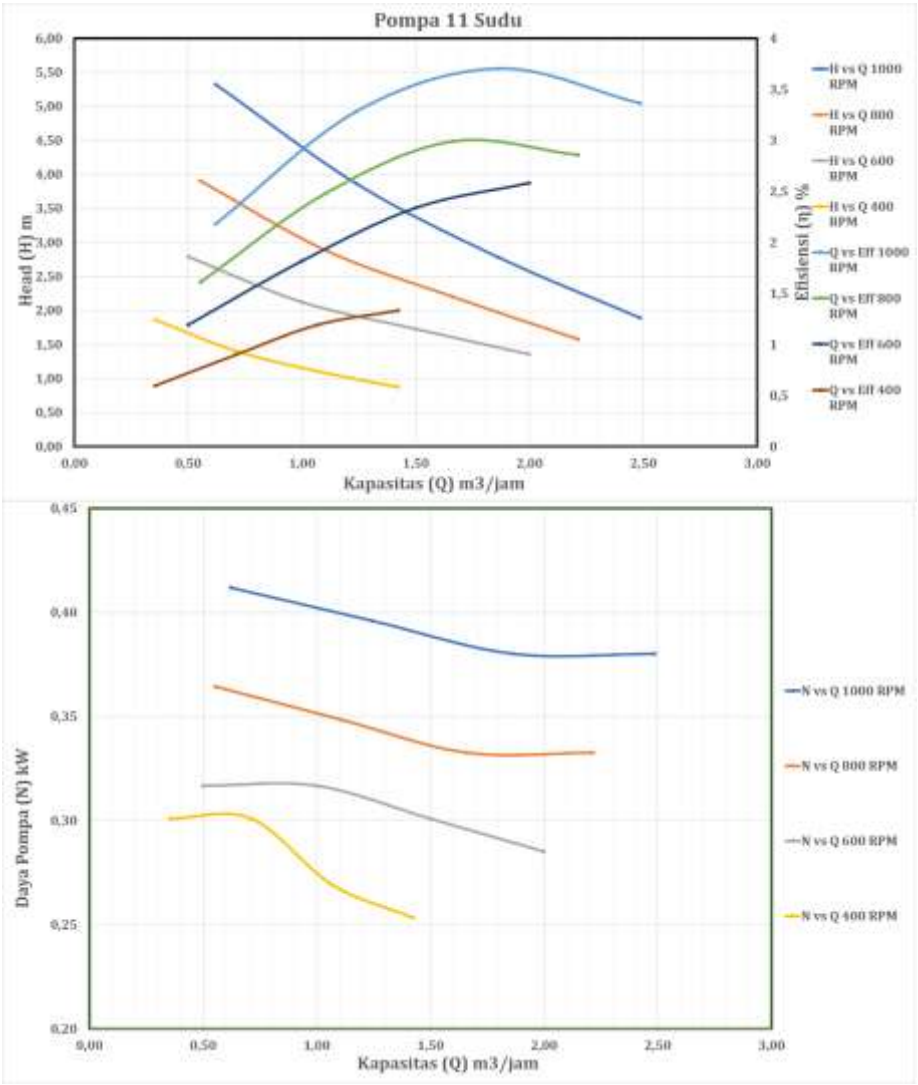
Tabel 3. Rekapitulasi Performa Hidrolik Empat Konfigurasi Sudu pada 1000 rpm

Sudu	Bukaan Katup	Debit Q (m^3/jam)	*Head* (m)	Efisiensi (%)	Daya Pompa (kW)
11	100%	2,486	1,89	3,36	0,38
11	75%	1,864	2,78	3,70	0,38
12	100%	2,772	2,26	4,48	0,38
12	75%	2,079	3,09	4,59	0,38
13	100%	2,640	2,09	3,63	0,41
13	75%	1,980	2,89	3,77	0,41
14	100%	2,790	2,29	4,56	0,38
14	75%	2,093	3,40	5,08	0,38

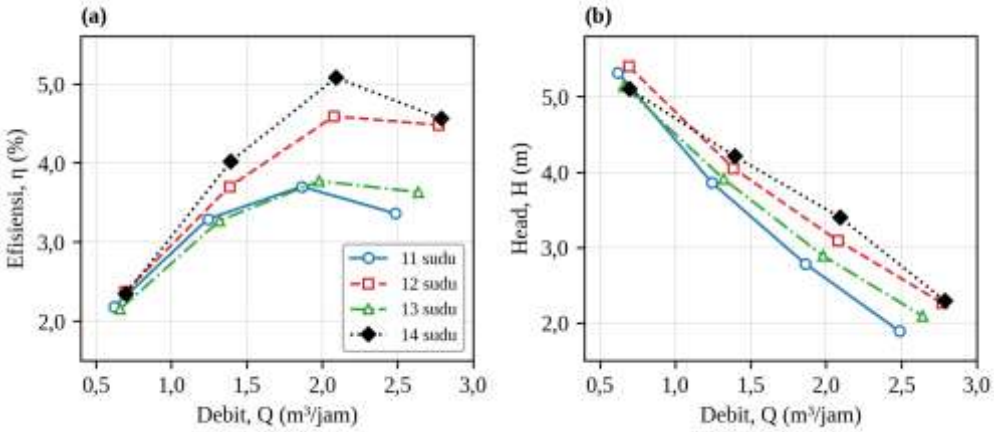
Melalui perbandingan langsung unjuk kerja keempat rotor pada kondisi operasi tertinggi (1000 rpm; Gambar 3), diperoleh hasil bahwa konfigurasi 14 sudu menghasilkan performa hidrolik paling superior dengan efisiensi tertinggi mencapai 5,08% pada bukaan debit 75%. Terdapat dua faktor mekanis utama yang mendasari keunggulan ini. Pertama, reduksi aliran balik (*backflow*): pada orientasi pompa vertikal (90°), gravitasi secara kontinu mendorong air jatuh kembali melalui celah toleransi (*clearance gap* 0,5 mm), sedangkan *pitch* paling rapat pada 14 sudu (2,85 cm) berfungsi sebagai penahan alami menyerupai efek sekat labirin (*labyrinth seal effect*) yang efektif memblokir laju kebocoran celah. Kedua, minimasi rugi gesek permukaan sudu (*vane skin friction losses*): meski secara teoritis jumlah sudu lebih sedikit memberi ruang sekat lebih longgar, data eksperimen menunjukkan efisiensi konfigurasi 11 sudu (3,70%) dan 13 sudu (3,77%) berada jauh di bawah 14 sudu, mengindikasikan ruang antarsudu pada konfigurasi tersebut belum mampu mengurung fluida secara optimal sehingga meningkatkan gaya gesek viskos yang membuang sebagian daya poros menjadi panas turbulensi.

Gambar 3 menunjukkan bahwa pada seluruh konfigurasi, penyempitan bukaan katup menurunkan debit dan menaikkan *head* secara monoton, sedangkan efisiensi mencapai puncak pada bukaan 75% lalu menurun pada bukaan yang lebih kecil. Pada bukaan 100% dan 75%, urutan kinerja konsisten, yaitu 14 > 12

> 13 > 11 sudu, baik untuk efisiensi maupun *head*. Selisih efisiensi antara 14 dan 12 sudu relatif kecil pada bukaan 100% (4,56% terhadap 4,48%) tetapi melebar pada bukaan 75% (5,08% terhadap 4,59%). Pada bukaan 25%, 12 sudu sedikit melampaui 14 sudu, dan pada bukaan 50% efisiensi 11 sudu sedikit di atas 13 sudu, sehingga keunggulan 14 sudu paling nyata di sekitar titik efisiensi terbaik. Dengan demikian, tren terhadap jumlah sudu tidak sepenuhnya monoton.



Gambar 2. Kurva Performa Pompa Ulir Vertikal Konfigurasi 11 Sudu (*Head*, Efisiensi, dan Daya terhadap Kapasitas)



Gambar 3. Perbandingan Efisiensi (a) dan *Head* (b) terhadap Debit pada Empat Variasi Jumlah Sudu (1000 rpm; Bukaan Katup 100%, 75%, 50%, dan 25%)

Secara keseluruhan, kurva *head* vs kapasitas pada seluruh konfigurasi (Gambar 2 dan Gambar 3) membuktikan karakteristik fundamental pompa perpindahan positif (*positive displacement pump*), yaitu tren berbanding terbalik antara kapasitas dan *head*: penyempitan katup keluaran memicu akumulasi gaya dorong aksial penuh pada fluida yang terkurung, sehingga tekanan statis di dalam rumah pompa meningkat signifikan. Kekurangan yang teridentifikasi adalah deviasi kemiringan kurva yang cukup ekstrem dibandingkan kondisi ideal, yang diindikasikan berasal dari kebocoran internal (*internal leakage*/*slip* hidrolis) melalui celah toleransi antarkomponen serta porositas mikro pada tutup bawah hasil *3D printing*, sehingga kapasitas debit aktual tereduksi cukup masif seiring meningkatnya *head*.

Terkait celah (*clearance gap*) sebesar 0,5 mm antara rotor (D_o = 109 mm) dan *casing* (110 mm), celah tersebut dapat dinilai relatif longgar untuk pompa ulir vertikal berskala kecil. Pada posisi vertikal, setiap sekat menahan beda tekanan akibat *head* sehingga sebagian fluida dapat bocor balik melalui celah (*slip* hidrolis), yang sejalan dengan kurva *head*-kapasitas yang curam dan efisiensi yang sangat rendah pada putaran 400 rpm. Kajian numerik pada turbin ulir Archimedes juga melaporkan bahwa kebocoran celah berkurang pada jumlah sudu yang lebih banyak dan lebih berpengaruh pada diameter yang lebih kecil [16], sejalan dengan keunggulan konfigurasi 14 sudu. Namun, celah tidak dapat diperkecil tanpa batas karena celah yang terlalu sempit dapat meningkatkan gesekan antara ujung sudu PLA dan *casing* PVC serta torsi *start* pompa, yang dapat memperburuk ketidaksesuaian torsi dengan kincir Savonius. Oleh karena itu, variasi celah perlu dikaji pada penelitian lanjutan untuk menentukan celah optimum.

Analisis menyeluruh terhadap seluruh data pengujian (400–1000 rpm, empat variasi sudu, empat bukaan katup) menghasilkan beberapa pola karakteristik yang konsisten dan merupakan ciri khas pompa perpindahan positif. Pertama, hubungan *head* terhadap kapasitas selalu berbanding terbalik pada seluruh variasi sudu dan putaran, dengan *head* tertinggi selalu dicapai pada bukaan debit 25% karena air yang terperangkap dalam sekat sudu (*bucket volume*) menerima gaya dorong penuh tanpa ruang pelepasan. Kedua, konsumsi daya input mekanis pompa relatif landai dan berbanding lurus terhadap kecepatan sudut, dengan daya tertinggi konsisten berada pada putaran 1000 rpm (0,38–0,43 kW). Ketiga, titik efisiensi terbaik (*Best Efficiency Point*/BEP) secara konsisten tercapai pada 1000 rpm dan bukaan debit 75% untuk seluruh konfigurasi, dengan efisiensi maksimum yang cenderung meningkat seiring penambahan jumlah sudu meskipun tidak monoton (konfigurasi 13 sudu lebih rendah daripada 12 sudu): 3,70% (11 sudu), 4,59% (12 sudu), 3,77% (13 sudu), hingga 5,08% (14 sudu). Keempat, performa paling minimum secara konsisten terjadi pada putaran teren-

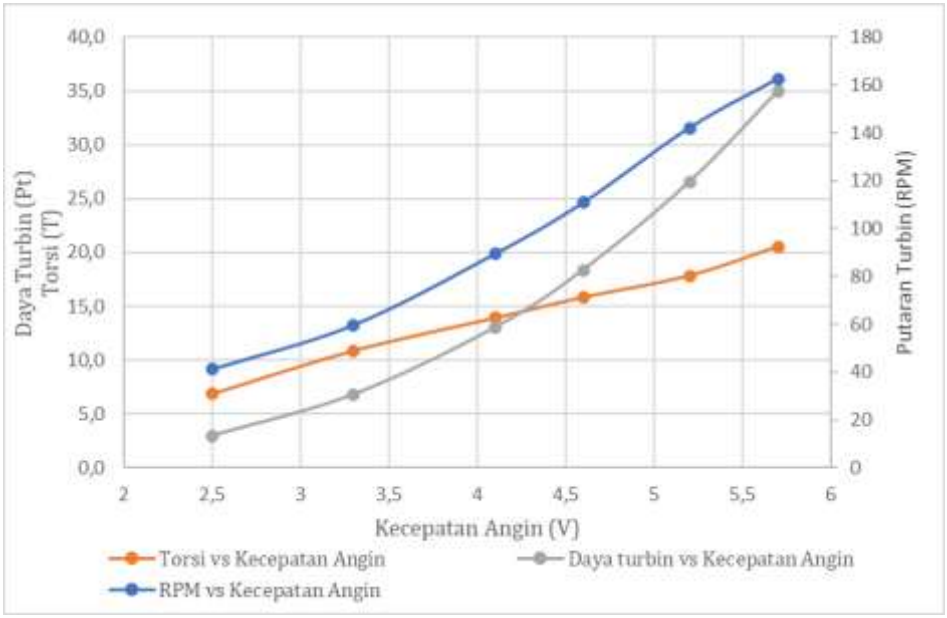
dah (400 rpm) dengan efisiensi hanya 0,60–0,67% pada bukaan debit 25%, karena waktu tinggal (*residence time*) fluida yang lebih lama pada putaran rendah membuat fenomena *slip* (kebocoran balik melalui *clearance*) menjadi sangat dominan sehingga konversi energi mekanis menjadi energi hidrolis menjadi kurang ekonomis. Ringkasan performa puncak (BEP) keempat konfigurasi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Titik Efisiensi Terbaik (*Best Efficiency Point*) Setiap Konfigurasi Sudu pada 1000 rpm, Bukaan Katup 75%

Sudu	Debit, Q (m^3/jam)	*Head* (m)	Efisiensi (%)	Daya Pompa (kW)
11	1,864	2,78	3,70	0,38
12	2,079	3,09	4,59	0,38
13	1,980	2,89	3,77	0,41
14	2,093	3,40	5,08	0,38

3.3 Karakteristik Kincir Angin Savonius

Pengujian komponen penggerak mula menggunakan kipas angin pada enam titik kecepatan angin (2,5–5,7 m/s) menunjukkan bahwa putaran kincir angin Savonius 4 sudu responsif terhadap perubahan kecepatan angin. Pada kecepatan angin terendah 2,5 m/s, kincir berputar 41,1 rpm dengan daya angin pada luas sudu turbin 2,95 watt dan torsi ekuivalen 0,69 N.m. Pada kecepatan 4,6 m/s, putaran mencapai 110,8 rpm dengan torsi ekuivalen 1,58 N.m, dan pada kecepatan tertinggi 5,7 m/s putaran mencapai 162,5 rpm dengan daya angin 34,96 watt dan torsi ekuivalen 2,05 N.m. Daya dan torsi tersebut dihitung dari persamaan dengan asumsi seluruh daya angin terserap oleh rotor sehingga dianggap sebagai batas atas, sedangkan yang diukur langsung hanya kecepatan angin dan putaran. Tren hubungan antara kecepatan angin, putaran poros dan torsi ekuivalen ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva Performa Turbin Angin Savonius (Kecepatan Angin terhadap Putaran Poros dan Torsi Ekuivalen)

3.4 Analisis Kesesuaian Daya (*Matching*) Turbin-Pompa

Kesesuaian karakteristik daya antara turbin penggerak dan beban pompa merupakan faktor kritis keberhasilan sistem hulu-hilir. Berdasarkan hasil pengujian, kincir angin Savonius pada pengujian dengan kipas angin pada kecepatan 2,5–5,7 m/s hanya mampu menghasilkan putaran maksimum 162,5 rpm, sedangkan ambang batas kerja minimal pompa ulir untuk mulai mengalirkan air adalah 400 rpm. Kesenjangan (*mismatch*) ini menyebabkan sistem mengalami macet mula (*starting torque stall*) apabila turbin dikopel langsung (*direct coupling*) tanpa transmisi peningkat kecepatan, karena torsi *start* pompa lebih besar daripada torsi yang mampu disediakan turbin pada rentang angin tersebut. Faktor lain yang turut memengaruhi performa total prototipe adalah ketidakseimbangan (*unbalance*) mekanis pada kopling penghubung poros yang belum dirancang secara *rigid*, serta keterbatasan penggunaan satu jenis turbin tunggal tanpa pembanding objektif. Temuan ini konsisten dengan penelitian Oghoghorie dkk. menegaskan pentingnya rasio transmisi yang tepat antara turbin Savonius poros vertikal dan beban pompa air agar sistem dapat bekerja optimal pada kecepatan angin rendah [17], serta penelitian Prayoga dan Ismail yang merekomendasikan penggunaan *gearbox* peningkat kecepatan pada sistem pompa air tenaga kincir angin Savonius untuk irigasi sawah [18]. Dengan demikian, integrasi sistem transmisi mekanis (*gearbox* atau *pulley-belt*) dengan rasio minimal 1:3 menjadi kebutuhan mendasar agar putaran kincir dapat dikonversi naik hingga memasuki ambang kerja minimal pompa.

Dari sisi keterbatasan prototipe, beberapa faktor non-ideal turut memengaruhi performa total sistem di luar aspek *mismatch* daya. Getaran dan kerugian mekanis akibat ketidakseimbangan (*unbalance*) pada kopling penghubung poros, yang dirancang tanpa perhitungan *rigid*, berkontribusi pada hilangnya sebagian energi mekanis sebelum diteruskan ke pompa. Selain itu, rembesan internal (*internal leakage*) melalui rongga mikro (porositas) pada dinding tutup bawah hasil *3D printing* turut menurunkan efisiensi volumetrik pompa dibandingkan kondisi ideal tanpa kebocoran. Meskipun demikian, dari sudut pandang aplikasi praktis, capaian debit pompa pada kisaran 1,86–2,79 m^3/jam pada putaran 1000 rpm tetap menunjukkan potensi nyata untuk memenuhi kebutuhan irigasi skala kecil-menengah pada lahan sawah tadah hujan, khususnya untuk periode pengairan tambahan pada masa peralihan musim ketika debit parit menyusut. Dengan penyempurnaan lebih lanjut pada sistem transmisi daya dan kekedapan komponen, teknologi ini berpeluang menjadi alternatif irigasi mandiri energi yang layak diterapkan secara luas oleh petani di wilayah dengan potensi angin sedang seperti Kecamatan Cepu, tanpa ketergantungan pada bahan bakar fosil maupun jaringan listrik PLN.

Perbandingan capaian penelitian ini terhadap beberapa penelitian sejenis sebelumnya disajikan pada Tabel 5. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa rentang operasional kecepatan angin kincir Savonius pada penelitian ini (2,5–5,7 m/s, kipas angin) berada pada kisaran yang sebanding dengan penelitian Taba dan Bedes (3,3–6 m/s), namun keduanya berbeda pada jenis beban yang digerakkan, yaitu pompa sentrifugal untuk kebutuhan tambak pada penelitian terdahulu, sedangkan penelitian ini menggunakan beban pompa ulir Archimedes yang bersifat perpindahan positif dan memerlukan torsi *start* lebih tinggi. Perbedaan karakteristik beban inilah yang menjadi salah satu penyebab utama mengapa sistem pada penelitian ini belum dapat dikopel langsung tanpa transmisi tambahan, sekaligus menjadi arah pengembangan utama untuk penelitian selanjutnya.

Tabel 5. Perbandingan dengan Penelitian Sejenis Sebelumnya

Peneliti (Tahun)	Jenis Penggerak	Jenis Beban	Kecepatan Angin Operasional
Taba & Bedes (2017) [7]	Kincir Savonius	Pompa sentrifugal (tambak)	3,3–6 m/s
Muhfidin & Hartana (2020) [8]	Kincir angin	Pompa air (lahan pasir)	–
Prayoga & Ismail (2016) [18]	Kincir Savonius	Pompa air sawah	–
Penelitian ini (2026)	Kincir Savonius 4 sudu	Pompa ulir Archimedes vertikal	2,5–5,7 m/s (kipas angin)

4. Kesimpulan

Prototipe pompa *screw* vertikal berpenggerak kincir angin Savonius 4 sudu berhasil dirancang dan diuji sebagai solusi irigasi mandiri energi bagi petani lahan tadah hujan di Kecamatan Cepu, Kabupaten Blora. Sistem pemompaan mengintegrasikan pompa ulir Archimedes berdiameter luar rotor 109 mm, diameter poros inti 54,5 mm, panjang aktif sudu 40 cm, dan *clearance gap* 0,5 mm terhadap *casing* PVC 4", dengan kincir angin Savonius berdiameter sudu 0,122 m dan tinggi sudu 0,4 m (luas sudu 0,306 m^2).

Pengujian laboratorium membuktikan bahwa putaran poros 1000 rpm secara konsisten menjadi kondisi operasi paling superior pada seluruh variasi sudu, dengan konfigurasi 14 sudu terbukti sebagai desain optimum (*optimum trade-off geometry*) yang mencapai efisiensi hidrolik neto tertinggi 5,08% pada bukaan katup 75%. Keunggulan ini disebabkan oleh *pitch* paling rapat (2,85 cm) yang berfungsi sebagai sekat labirin alami serta sudut sudu masuk dan keluar yang paling besar, sehingga menyeimbangkan reduksi aliran balik dan minimasi rugi gesek permukaan. Kurva *head* vs kapasitas yang dihasilkan juga membuktikan karakteristik fundamental pompa perpindahan positif.

Pada sisi penggerak, kincir angin Savonius pada pengujian dengan kipas angin pada kecepatan 2,5–5,7 m/s hanya mampu menghasilkan putaran maksimum 162,5 rpm dengan torsi ekuivalen terhitung 2,05 N.m, belum memenuhi ambang kerja minimal pompa sebesar 400 rpm sehingga terjadi *mismatch* daya hulu-hilir dan sistem belum dapat dikopel langsung. Untuk penelitian lanjutan, disarankan penambahan transmisi pengurang kecepatan (gearbox/pulley-belt) dengan rasio minimal 1:3, perhitungan rigid pada komponen kopling dan struktur penopang, penggantian material tutup bawah dari 3D printing menjadi PVC solid untuk menghilangkan porositas internal, studi komparatif dengan variasi tipe turbin lain, serta variasi celah (*clearance gap*) dan rentang jumlah sudu yang lebih lebar guna memperoleh karakter penggerak yang paling optimal bagi beban pompa ulir vertikal.

Daftar Pustaka

[1] A. Wihardjaka, A. Pramono, and M. T. Sutriadi, "Peningkatan Produktivitas Padi Sawah Tadah Hujan Melalui Penerapan Teknologi Adaptif Dampak Perubahan Iklim," J. Sumberd. Lahan, vol. 14, no. 1, p. 25, 2020, doi: 10.21082/jsdl.v14n1.2020.25-36.

[2] A. Kasno, D. Setyorini, and I. W. Suastika, "Pengelolaan Hara Terpadu pada Lahan Sawah Tadah Hujan sebagai Upaya Peningkatan Produksi Beras Nasional," J. Sumberd. Lahan, vol. 14, no. 1, p. 15, 2020, doi: 10.21082/jsdl.v14n1.2020.15-24.

[3] F. A. Darmawan, I. Aqsha, and A. Hambali, "Penerapan Teknologi Pompa Irigasi Sawah berbasis Tenaga Surya di Desa Parambambe Kabupaten Takalar Sulawesi Selatan," SEMAR, vol. 12, no. 1, p. 54, 2023, doi: 10.20961/semar.v12i1.65873.

[4] Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), "Buku Publikasi Klimatologi Provinsi Jawa Tengah - Potensi Angin Harian Kawasan Pesisir dan Dataran Rendah," BMKG, Jakarta, Indonesia, 2022. Tersedia: https://dataonline.bmkg.go.id/

[5] R. Rahmawaty, S. Suherman, S. Dharma, and A. Sai'in, "Kajian Eksperimental pada Turbin Screw Archimedes Skala Kecil," J. Rekayasa Mesin, vol. 17, no. 1, p. 95, 2022, doi: 10.32497/jrm.v17i1.3065.

[6] W. L. Chan, U. K. Jamaludin, and N. S. Azahari, "Archimedes Screw Pump Efficiency Based on Three Design Parameters using Computational Fluid Dynamics Software - Ansys CFX," J. Phys. Conf. Ser., vol. 2688, no. 1, 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2688/1/012015.

[7] H. T. Taba and Y. Bedes, "Analisa Pemanfaatan Kincir Angin Savonius untuk Penggunaan Pompa Sirkulasi Air bagi Kebutuhan Pertambakan Pembibitan Ikan," Jurnal Teknik Mesin, vol. 6, no. 2, pp. 54–62, 2017.

[8] R. Muhfidin and D. R. Hartana, "Rancang Bangun Sistem Penggerak Pompa Air Menggunakan Kincir Angin untuk Pengairan Rumput di Lahan Pasir," ReTII, vol. 2020, no. Agustus, pp. 129–133, 2020.

[9] M. Arham, M. I. Nur, H. Hs, and A. A. Salam, "Analisis Perbandingan Performa Turbin Archimedes Screw Menggunakan Closed System," pp. 8–17, 2025.

[10] R. Alipour, R. Alipour, F. Fardian, S. S. R. Koloor, and M. Petru, "Performance Improvement of a New Proposed Savonius Hydrokinetic Turbine: A Numerical Investigation," Energy Reports, vol. 6, pp. 3051–3066, 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.10.072.

[11] Kasturi, S. Sujono, and D. K. Puspaningrum, "Desain dan Analisis Turbin Angin sebagai Penggerak Kompresor Aerasi Tambak Udang guna Mendukung Energi Berkelanjutan," Jurnal Nasional Pengelolaan Energi Migas, vol. 7, no. 2, pp. 125–134, 2025, doi: 10.37525/mz/2025-2/1587.

[12] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application," Adv. Ind. Control, 2008, doi: 10.1007/978-1-84800-080-3_1.

[13] F. M. White, Fluid Mechanics, 4th ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 1999.

[14] G. Muller and J. Senior, "Simplified Theory of Archimedean Screws," J. Hydraul. Res., vol. 47, no. 5, pp. 666–669, 2009, doi: 10.3826/jhr.2009.3475.

[15] C. Rorres, "The Turn of the Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw," J. Hydraul. Eng., vol. 126, no. 1, pp. 72–80, 2000, doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2000)126:1(72).

[16] M. G. A. dos Reis, "Simulação Numérica e Otimização da Eficiência Hidráulica e da Potência Mecânica da Turbina de Arquimedes," Ph.D. dissertation, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Univ. Fed. Uberlândia, Uberlândia, Brazil, 2021, doi: 10.14393/ufu.te.2021.286.

[17] O. Oghoghorie, P. O. Ebunilo, and E. K. Orhorhoro, "Development of a Savonius Vertical Axis Wind Turbine Operated Water Pump," J. Appl. Res. Ind. Eng., vol. 7, no. 2, pp. 190–202, 2020, doi: 10.22105/jarie.2020.243507.1186.

[18] S. B. Tulung Prayoga and Andhi Akhmad Ismail, "Rancang Bangun Pompa Air Tenaga Angin Untuk Pengairan Sawah Menggunakan Vertical Wind Turbine Tipe Savonius," J. Rekayasa Mesin, vol. 9, no. 1, Apr. 2016, doi: 10.32497/rm.v9i1.444.

Daftar Simbol

A	=	Luas sudu turbin, m^2
Q	=	Debit aliran air, m^3/jam
H	=	*Head* total pompa, m
η	=	Efisiensi hidrolik pompa, %
T	=	Torsi ekuivalen turbin, N.m
S	=	*Pitch* (jarak antar sudu heliks), cm
β, α	=	Sudut sudu masuk dan sudu keluar, °
ρ	=	Massa jenis fluida, kg/m^3
D_o, D_i	=	Diameter luar rotor dan diameter poros inti, mm
σ	=	Rasio diameter rotor (D_i/D_o), –
N	=	Jumlah sudu, –
L	=	Panjang aktif rotor, cm
g	=	Percepatan gravitasi, m/s^2
V	=	Kecepatan angin, m/s

n, ω	=	Putaran poros (rpm) dan kecepatan sudut (rad/s)
P_{in}	=	Daya angin pada luas sudu turbin, W
N_h, N_p	=	Daya hidrolik neto dan daya poros pompa, kW