

PENGARUH VARIASI SUDUT SUDU TURBIN AIR CROSFLOW TERHADAP PERFORMANSI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR (PLTA) PIKOHIDRO

Anis Fida Adilah ¹⁾ ✉, Nugrah Rekto Prabowo ²⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Mesin,
STT Wiworotomo Purwokerto
Jalan Semingkir No.1, Kabupaten
Banyumas, Jawa Tengah, INDONESIA –
53134
anisf1615@gmail.com

²⁾ Jurusan Teknik Mesin,
STT Wiworotomo Purwokerto
Jalan Semingkir No.1, Kabupaten
Banyumas, Jawa Tengah, INDONESIA –
53134
nugrahprabowo03@gmail.com

Abstract

The demand for electricity continues to increase, while most of the energy sources still rely on fossil fuels that negatively impact the environment. One solution is to utilize renewable energy sources such as water through a Pico Hydro Power Plant (PLTPH) using a turbine, in which one of the factors affecting its performance is the blade angle. This study used three variations of blade angles, namely 27.5°, 32.5°, and 37.5°, with a constant water discharge of 0.0131 m³/s and five loading levels ranging from no load to 305 watts. The parameters observed include turbine power, generator power, and efficiency. The test results show that the 32.5° blade angle produced the highest performance, with a maximum turbine power of 363.66 watts and generator power of 179.15 watts under no-load conditions, as well as the highest efficiency of 70.71%. Meanwhile, the 37.5° blade angle showed the lowest performance under a 305-watt load, with turbine power of 224.48 watts and generator power of 16.23 watts. The lowest efficiency was also recorded at the 37.5° angle, which was 40.65%. These results prove that the 32.5° blade angle is the most optimal configuration for achieving the best turbine performance in a PLTPH system.

Keywords : Crossflow Turbine, Blade Angle, Performancy.

1. PENDAHULUAN

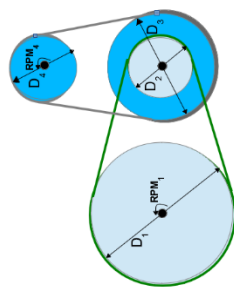
Energi listrik merupakan kebutuhan utama dalam kehidupan modern dan terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk. Sayangnya, sebagian besar penyediaannya masih bergantung pada bahan bakar fosil yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Hal ini mendorong perlunya pemanfaatan energi terbarukan sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial adalah energi air. Menurut data Dewan Sumber Daya Air Nasional tahun 2012, Indonesia memiliki kekayaan sumber daya air terbesar kelima di dunia dengan potensi air hujan yang turun mencapai 7 triliun m³, sehingga sumber daya air melimpah terutama di daerah pedesaan dengan banyaknya aliran sungai kecil dan saluran irigasi, yang dapat dimanfaatkan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro (PLTPH) dengan kapasitas 100–5000 watt ^[1].

Untuk skala kecil, turbin *crossflow* sering digunakan karena memiliki efisiensi yang cukup baik, konstruksi sederhana, serta mudah dalam perawatan ^[2]. Supaya kinerja turbin *crossflow* maksimal, maka sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter utama, di antaranya sudut sudu, jumlah sudu, dan debit aliran air ^[3]. Beberapa penelitian sebelumnya juga menunjukkan pengaruh variasi sudut sudu terhadap performa turbin. Misalnya, penelitian Prasetyo, Agung (2021) dengan judul Analisa Perubahan Daya Aktif Generator Serta Efisiensi Mekanik Generator Yang Dipengaruhi Oleh Perubahan

Kemiringan Sudut Sudu Turbin Berpenampang Pelat Datar Pada Kinerja Turbin Aliran *Crossflow* Poros Horizontal, ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi sudut sudu pada turbin *crossflow*. Dengan menguji sudut sudu sebesar 0° , 5° , 10° , 15° , dan 20° , hasil pengujian menunjukkan bahwa sudut sudu sebesar 15° menghasilkan performa paling optimal dengan daya listrik 1,092 W, dan efisiensi 36,40%.^[4] Penelitian lain menyebutkan bahwa variasi sudut sudu yang tepat dapat meningkatkan kemampuan turbin dalam mengkonversi energi air menjadi energi mekanik^[5].

Namun, masih terdapat keterbatasan pada penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menguji sudut tertentu dengan kondisi debit spesifik. Maka pengembangan desain penelitian yang saya lakukan adalah dengan merujuk pada dua hal, yaitu variasi sudut sudu dan transmisi yang digunakan. Sudut sudu mengacu pada penelitian Prasetyo, Agung (2021) dan Arrianto, Diaz Aditya (2018), yang menyatakan bahwa sudut sudu sangat memengaruhi daya dan efisiensi. Prasetyo menemukan bahwa sudut sudu 15° menghasilkan daya dan efisiensi tertinggi, dan Arrianto menunjukkannya pada sudut 25° ^[6], sehingga penelitian ini menggunakan rentang sudut yaitu $27,5^\circ$ hingga $37,5^\circ$ dengan interval 5° untuk mencari titik optimal kinerja turbin.

Sedangkan untuk meningkatkan daya yang dihasilkan generator, putaran dari turbin ditransmisikan menggunakan sistem *pulley* ganda bertingkat, dimulai dari *pulley* pada poros turbin sebagai penggerak, lalu ditransmisikan melalui dua *pulley* perantara, dan akhirnya dihubungkan ke *pulley* pada poros generator sebagai yang digerakkan. Sabuk-V dibelitkan di antara masing-masing pasangan *pulley* tersebut.^[7] Sistem ini memiliki konfigurasi *pulley* D1 = 66 cm, D2 = 15 cm, D3 = 35 cm, dan D4 = 8 cm



Gambar 1. Design *pulley* bertingkat penggerak generator

Rasio transmisi dari D1 ke D4 adalah sekitar 1:19, artinya setiap satu putaran turbin akan menghasilkan sembilan belas putaran pada poros generator. Hal ini sesuai dengan prinsip transmisi daya menggunakan *pulley* dan sabuk, di mana kecepatan putar berbanding terbalik dengan diameter *pulley*.^[8] Maka dapat disimpulkan tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi sudut sudu terhadap daya dan efisiensi turbin, serta menentukan sudut terbaik yang dapat menghasilkan performa optimal. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi pengembangan pembangkit listrik terbarukan skala kecil, khususnya di wilayah pedesaan yang memiliki banyak aliran sungai

Sebelum melakukan perhitungan performansi yang dihasilkan berupa daya dan efisiensi, maka perlu diketahui persamaan sebagai berikut :

1. Debit air (Q)

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Dengan V adalah volume air (m^3) dan t adalah waktu (s)^[9]

2. Kecepatan aliran air teoritis (V_t)

$$V_t = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2)$$

Dengan g adalah gravitasi (m/s^2) dan h adalah head (m)

3. Putaran Generator (n)

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Dengan D_1 Diameter *pulley* yang digerakkan (mm) dan n_1 adalah Putaran *pulley* penggerak (rpm) [8]

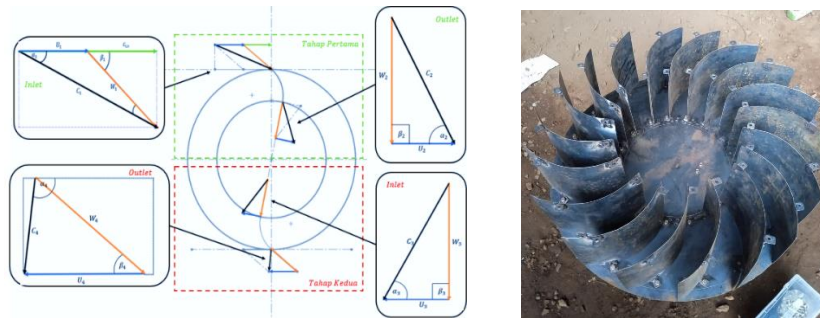
4. Daya Generator (Pg)

$$Pg = V \times I \quad (4)$$

V adalah tegangan (volt) dan I adalah kuat arus (ampere) [9]

5. Daya Turbin

Untuk menghitung daya turbin pada setiap pembebanan dihitung menggunakan segitiga kecepatan [10]



Gambar 2. Segitiga kecepatan turbin aksi dan perbandingannya

$$C1 = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

Dengan C1 yaitu kecepatan absolut inlet, Q adalah debit air, A adalah luas penampang

$$N = n \times \frac{2\pi}{60} \quad (6)$$

Dengan N yaitu Putaran dan n adalah nilai RPM turbin

$$R1 = \frac{d1}{2} \quad (7)$$

Dengan R1 adalah jari-jari luar dan d_1 yaitu diameter luar

$$R2 = \frac{d2}{2} \quad (8)$$

Dengan R2 adalah jari-jari dalam dan d_2 adalah diameter dalam

$$U1 = \omega \cdot R1 \quad (9)$$

U1 adalah kecepatan sudu inlet, ω adalah kecepatan angular (rad/s) dan R1 adalah jari – jari luar

$$U2 = \omega \cdot R2 \quad (10)$$

Dimana U2 ada kecepatan sudu outlet, ω adalah kecepatan sudut angular (rad/s) dan R2 adalah jari – jari dalam

$$W = \sqrt{C1^2 + U1^2 - 2 \cdot C1 \cdot U1 \cdot \cos \theta} \quad (11)$$

Dimana C adalah kecepatan absolut, U adalah kecepatan sudu inlet dan θ dan sudut sudu

$$\frac{\sin \theta}{W} = \frac{\sin \beta1}{U1} \quad (12)$$

W adalah kecepatan relatif, U1 adalah kecepatan sudu inlet, θ adalah sudut sudu, $\beta1$ adalah sudut air yang masuk ke sudu turbin

$$\alpha1 = \theta + \beta1 \quad (13)$$

$\alpha1$ adalah sudut kemiringan inlet, θ sudut sudu, $\beta1$ adalah sudut air yang masuk ke sudu turbin

$$C = \sqrt{U2^2 + W^2 - 2 \cdot U2 \cdot W \cdot \sin \alpha1} \quad (14)$$

Dimana W adalah kecepatan relatif, U_2 adalah kecepatan sudu outlet dan α_1 dan sudut kemiringan inlet

$$\frac{\sin \alpha_1}{C_2} = \frac{\sin \beta_2}{U_2} \quad (15)$$

Dengan U adalah kecepatan sudu outlet, C adalah kecepatan absolut outlet dan α_1 adalah sudut kemiringan inlet

$$\alpha_2 = \sin \alpha_1 + \beta_2 \quad (16)$$

α_2 adalah sudut kemiringan outlet, $\sin \alpha_1$ yaitu sudut kemiringan inlet dan β_2 sudut air meninggalkan sudu turbin

$$C_{1x} = \cos \theta^\circ \cdot C_1 \quad (17)$$

Dimana C_{1x} adalah kecepatan sudu

$$C_{1y} = \sin \theta^\circ \cdot C_1 \quad (18)$$

Dimana C_{1y} adalah kecepatan relatif

$$C_{2x} = \cos \alpha_1 \cdot C_2 \quad (19)$$

$$C_{2y} = \sin \alpha_1 \cdot C_2 \quad (20)$$

$$F = \rho \cdot Q \cdot (C_2 - C_1) \quad (21)$$

$$F_x = \rho \cdot Q \cdot (C_{2x} - (-C_{1x})) \quad (22)$$

$$F_y = \rho \cdot Q \cdot (C_{2y} - (-C_{1y})) \quad (23)$$

$$F_{total} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (24)$$

$$P = F_{total} \cdot U_1 \quad (25)$$

6. Daya Air Mengalir (Pa)

$$Pa = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \quad (26)$$

Dimana Q adalah debit air (m^3/s), ρ adalah massa jenis air (kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2) dan H adalah ketinggian jatuh (*head*) air (m) ^[9]

7. Efisiensi Turbin (η)

$$\eta = \frac{P_t}{P_a} \times 100 \% \quad (27)$$

Merupakan ukuran kemampuan untuk menggunakan sumber daya secara optimal, dengan tujuan memaksimalkan hasil (output) sambil meminimalkan penggunaan sumber daya (input) ^[11]

2. METODE DAN BAHAN

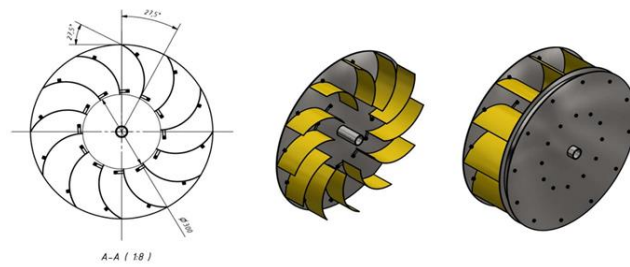
2.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan adalah kuantitatif dengan pendekatan eksperimen. Dibat untuk pembangkit listrik tenaga pikohidro menggunakan turbin air jenis *crossflow* dengan variasi sudut sudu $27,5^\circ$, $32,5^\circ$, dan $37,5^\circ$.



Gambar 3. Variasi sudut sudu turbin tampak samping (kiri) tampak atas (kanan)

Dengan jumlah sudu sebanyak 12 buah, diameter luar turbin sebesar 70 cm dan diameter dalam turbin 30 cm.



Gambar 4. Sudut sudu turbin *crossflow* 27,5°

Penelitian dilakukan di Sungai Kubangan, Desa Gununglurah, Cilongok, Kabupaten Banyumas. Penelitian dilakukan dengan cara mengalirkan air berdebit 0,0131 m³/s melalui pipa berdiameter 4 inci dari head setinggi ±2 meter menuju nozzle. Aliran air dari nozzle diarahkan ke sudu turbin *crossflow* sehingga turbin berputar. Putaran turbin kemudian diteruskan ke poros generator menggunakan sabuk dan *pulley*, untuk kemudian diubah menjadi energi listrik.



Gambar 5. Pengujian Turbin

Pengujian dilakukan pada tiga variasi sudut sudu, yaitu 27,5°, 32,5°, dan 37,5°. Setiap variasi sudut diuji dengan lima tingkat pembebanan, yaitu tanpa beban, lampu 100 watt, 200 watt, 300 watt, dan 305 watt.

Data yang diukur meliputi putaran turbin, tegangan, dan arus listrik yang dihasilkan untuk menghitung performansi turbin. Data yang diukur pada saat penelitian didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel 1. Hasil Pengukuran Sudut Sudu 27,5°

Sudut sudu	Beban (Watt)	Putaran (Rpm)	Tegangan (Volt)	Kuat arus (Ampere)
27.5°	0	101.8	218.53	0.62
	100	91.5	164.9	0.473
	200	87.4	121.5	0.348
	300	85.5	80.1	0.247
	305	84.9	74.1	0.223

Tabel 2. Hasil Pengukuran Sudut Sudu 32,5°

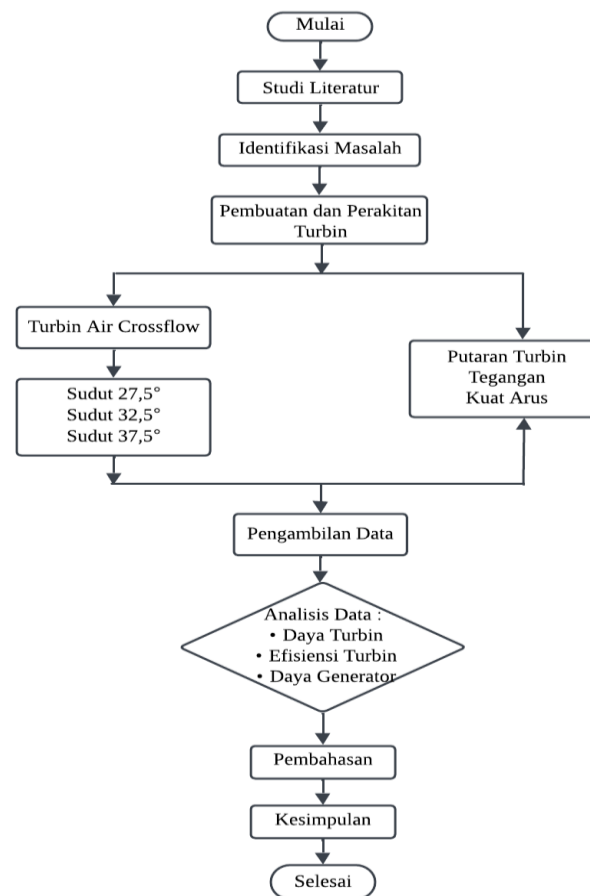
Sudut sudu	Beban (Watt)	Putaran (Rpm)	Tegangan (Volt)	Kuat arus (Ampere)
32.5°	0	112.2	238.87	0.75
	100	99.43	175.03	0.571

200	95.1	123.2	0.363
300	90.6	80.3	0.237
305	90.1	79.1	0.23

Tabel 3. Hasil Pengukuran Sudut Sudu 37,5°

Sudut sudu	Beban (Watt)	Putaran (Rpm)	Tegangan (Volt)	Kuat arus (Ampere)
37.5°	0	100.70	214.57	0.61
	100	86.97	155.93	0.436
	200	80.3	108.6	0.306
	300	78.2	80.2	0.226
	305	78.0	73.43	0.221

2.2 Flowchart Penelitian

**Gambar 6.** Flowchart Penelitian

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Perhitungan Penelitian

Berdasarkan data yang sudah diukur, maka dapat diperoleh hasil sebagai berikut

1. Debit Air

Untuk mengukur debit air, digunakan metode pengukuran langsung dengan ember berkapasitas 60 liter (konversi ke satuan $m^3 = 0,06 m^3$) dan rata-rata waktu 4,5 s

$$Q = \frac{0,06m^3}{4,57 s} = 0,0131 m^3/s$$

2. Kecepatan Aliran Air Teoritis

Untuk mengetahui kecepatan aliran air, digunakan kecepatan air teoritis (V_t) menggunakan persamaan 2

$$\begin{aligned} V_t &= \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \\ &= \sqrt{2 \cdot 9,807 \cdot 2} \\ &= 6,26 \text{ m/s} \end{aligned}$$

3. Putaran Generator

Untuk menghitung putaran poros generator pada setiap pembebanan dihitung menggunakan persamaan 3 sebagai berikut :

$$n_4 = \frac{35 \times 447,92}{8} = 1959,65 \text{ rpm}$$

4. Daya Generator

Data voltage dan arus listrik didapat dari pengujian pada setiap tahapan proses.

$$\begin{aligned} P_g &= V \times I \\ &= 218,5 \text{ V} \times 0,62 \text{ A} \\ &= 135,4 \text{ Watt} \end{aligned}$$

5. Daya Turbin

Untuk menghitung daya turbin pada setiap pembebanan dihitung menggunakan segitiga kecepatan dengan persamaan 5 hingga 25

Maka didapat untuk daya yang dihasilkan

$$\begin{aligned} P &= F_{\text{tot}} \times \vartheta 1 \\ &= 77,73 \times 3,80 \\ &= 295,71 \text{ Watt} \\ &= 0,29571 \text{ kW} \end{aligned}$$

6. Daya Air Mengalir

Untuk menghitung daya air yang mengalir (P_a) menggunakan persamaan 26 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} P_a &= \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \\ &= 998 \times 9,807 \times 0,0131 \times 4 \\ &= 512,85 \text{ watt} \end{aligned}$$

7. Efisiensi Turbin

Untuk menghitung nilai efisiensi turbin dapat menggunakan persamaan 27 sebagai berikut :

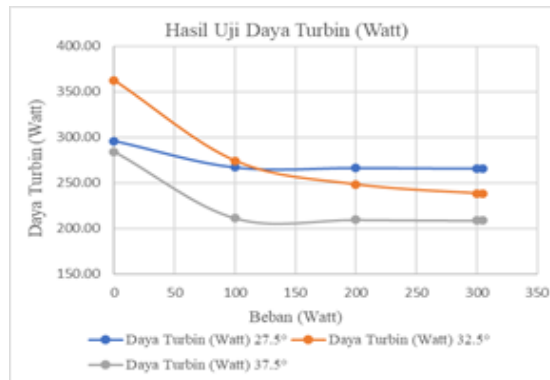
$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_t}{P_a} \times 100 \% \\ &= \frac{295,71}{512,85} \times 100 \% \\ &= 57,7 \% \end{aligned}$$

3.2 Analisa Data Penelitian

Data yang sudah dihitung maka akan dianalisa dan didapat hasil sebagai berikut:

Tabel 4. Analisa Data Daya Turbin

Beban (W)	Daya Turbin (Watt)		
	27.5°	32.5°	37.5°
0	295.71	362.66	284.00
100	266.92	274.19	211.41
200	266.38	248.25	209.64
300	265.71	238.48	208.72
305	265.44	238.48	208.63
Daya Maksimum	295.71	362.66	284.00

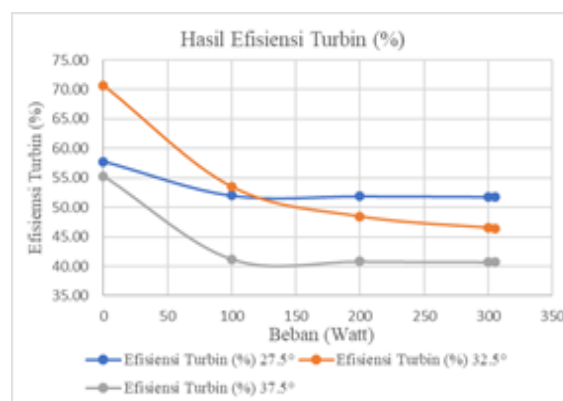


Gambar 7. Grafik Daya Turbin

Berdasarkan grafik, sudut sudu $32,5^\circ$ menghasilkan daya turbin paling tinggi sebesar 362,66 watt di tanpa beban. Hal ini menunjukkan bahwa pada sudut tersebut, arah aliran air dari *nozzle* mampu mengenai sudu dengan sudut tumbukan mendekati 90° [4] sehingga menghasilkan gaya dorong maksimum. Jika dibandingkan dengan sudut sudu $27,5^\circ$, daya tertingginya sedikit lebih rendah yaitu 295,71 watt. Sudut yang terlalu landai menyebabkan air tidak menghantam sudu dengan baik, sehingga gaya dorong yang dihasilkan lebih kecil dan mengurangi kinerja putaran turbin. Sementara itu, sudut sudu $37,5^\circ$ menunjukkan performa paling rendah dengan daya terendahnya hanya 208,63 watt di pembebanan 305 watt. Sudut yang terlalu besar menyebabkan aliran air menabrak sudu dengan arah yang melewati titik optimal (lebih dari 90°), sehingga menurunkan dorongan dan menyebabkan sebagian energi air hilang akibat percikan atau turbulensi. Hal ini menunjukkan bahwa baik sudut terlalu kecil maupun terlalu besar sama-sama kurang efisien, dan sudut optimal berada di tengah-tengah yaitu $32,5^\circ$, karena mampu mengarahkan aliran air dengan kontrol yang baik menuju sudu sehingga menghasilkan daya dorong optimal tanpa banyak kehilangan energi

Tabel 5. Analisa Data Efisiensi Turbin

Beban (Watt)	Efisiensi Turbin (%)		
	27.5°	32.5°	37.5°
0	57.66	70.71	55.38
100	52.05	53.46	41.22
200	51.94	48.41	40.88
300	51.81	46.50	40.70
305	51.76	46.50	40.68
Daya Maksimum	57.66	70.71	55.38

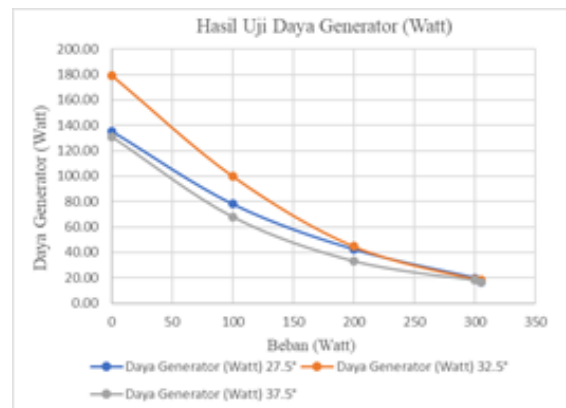


Gambar 8. Grafik Efisiensi Turbin

Gambar menunjukkan hubungan antara variasi beban dengan efisiensi turbin pada tiga konfigurasi sudut sudu, yaitu $27,5^\circ$, $32,5^\circ$, dan $37,5^\circ$. Dari grafik dapat dilihat bahwa efisiensi tertinggi dicapai saat kondisi tanpa beban, yaitu pada sudut $32,5^\circ$, yang mencapai nilai sebesar 70,71%. Namun, seiring meningkatnya beban, efisiensi pada sudut ini mengalami penurunan hingga mencapai sekitar 51,76% di sudut sudu $27,5^\circ$ dengan beban 305 watt. Berbeda dengan kedua sudut tersebut, sudut $37,5^\circ$ menghasilkan efisiensi terendah pada semua tingkat beban. Efisiensi awalnya hanya 55,38% dan terus menurun hingga mencapai titik terendah sebesar 40,68%. Ini menandakan bahwa sudut sudu yang terlalu besar menyebabkan aliran air tidak sepenuhnya dimanfaatkan oleh sudu turbin, sehingga efisiensinya rendah dan kurang optimal untuk menghasilkan daya. Perbedaan efisiensi ini dipengaruhi oleh berbagai hal, seperti kesesuaian debit air terhadap kapasitas turbin, tinggi jatuh air (head), serta arah dan kecepatan aliran yang mengenai sudu. Selain itu, faktor desain *nozzle* juga memengaruhi efisiensi secara keseluruhan ^[12]

Tabel 6. Analisa Data Daya Generator

Beban (W)	Daya Generator (Watt)		
	$27,5^\circ$	$32,5^\circ$	$37,5^\circ$
0	135.49	179.15	130.89
100	78.00	99.94	67.99
200	42.28	44.72	33.23
300	19.78	19.03	18.13
305	16.52	18.19	16.23
Daya Maksimum	135.49	179.15	130.89



Gambar 9. Grafik Daya Generator

Gambar tersebut memperlihatkan bahwa seluruh kurva menunjukkan penurunan daya seiring dengan bertambahnya beban. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar beban yang diberikan, semakin menurun pula daya listrik yang dihasilkan oleh generator. Penurunan ini terjadi karena beban yang lebih besar membutuhkan energi yang lebih besar pula untuk diputar, sehingga turbin kesulitan mempertahankan kecepatan yang optimal.

Kurva berwarna oranye ($32,5^\circ$) selalu berada di atas dua kurva lainnya, dengan daya tertingginya mencapai 179,15 watt, yang menandakan bahwa sudut sudu $32,5^\circ$ menghasilkan daya tertinggi secara konsisten. Ini memperkuat kesimpulan bahwa sudut $32,5^\circ$ merupakan sudut optimal, karena sudu pada sudut ini menerima aliran air dengan sudut tumbukan mendekati 90° . Sementara itu, sudut $37,5^\circ$ (abu-abu) menghasilkan daya paling rendah di seluruh rentang beban hingga menurun ke 16,23 watt pada pembebanan 305 watt. Hal ini menandakan bahwa sudut sudu yang terlalu besar menyebabkan aliran air mengenai sudu dengan arah yang kurang efektif, sehingga energi air tidak

sepenuhnya dikonversi menjadi putaran. Sudut $27,5^\circ$ (biru) masih menghasilkan daya yang lebih tinggi daripada $37,5^\circ$, namun tetap berada di bawah $32,5^\circ$ karena sudut yang terlalu landai menyebabkan energi air tidak sepenuhnya dihantarkan ke sudu.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Astuti (2022) juga menegaskan bahwa sudut sudu merupakan salah satu parameter paling berpengaruh dalam perolehan daya turbin *crossflow*. Penelitian ini juga sejalan dengan Prasetyo, Agung (2021), yang menyebutkan bahwa di rentang sudut sudu tersebut energi air dapat mengenai sudu lebih efektif. Secara keseluruhan, grafik ini menegaskan bahwa peningkatan beban akan menurunkan daya generator, dan variasi sudut sudu memiliki pengaruh signifikan terhadap kemampuan sistem dalam menghasilkan daya, dengan sudut optimal berada di $32,5^\circ$

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pengujian dan analisa yang telah diolah maka didapatkan kesimpulan bahwa:

1. Variasi sudut sudu berpengaruh signifikan terhadap daya turbin dan generator. Sudut sudu $32,5^\circ$ menghasilkan daya tertinggi pada pengujian tanpa beban (363,66 watt untuk turbin dan 179,15 watt untuk generator). Sebaliknya, sudut $37,5^\circ$ menghasilkan daya terendah pada pembebanan 305 watt (208,63 watt untuk turbin dan 16,23 watt untuk generator).
2. Sudut sudu juga memengaruhi efisiensi turbin. Sudut $32,5^\circ$ menghasilkan efisiensi tertinggi tanpa beban sebesar 70,71%, sedangkan sudut $37,5^\circ$ menghasilkan efisiensi terendah sebesar 40,68% pada beban 305 watt.
3. Dari pengujian lima tingkat pembebanan (0, 100, 200, 300, dan 305 watt), sudut sudu $32,5^\circ$ terbukti paling optimal dengan daya dan efisiensi yang lebih stabil dibandingkan variasi sudut lainnya.

PERNYATAAN TERIMA KASIH

Melalui pernyataan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada pembimbing Drs. Nugrah Rekto Prabowo, S.T., M.T. yang telah membantu penulis dalam merampungkan artikel pada Jurnal Rekayasa Mesin ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Penche and I. Minas. Layman's Guide Book on How to Develop a Small Hydro Site. Brussel: European Small Hydropower Association. 1998.
- [2] Jayanegara, S., R. Efendi, M. Hasim, dan D. M. Rifqie, "Uji Kinerja Turbin *Crossflow* Skala Laboratorium Sebagai Pembangkit Listrik," *PATRIA ARTHA Technological Journal*. vol. 7, no. 1, p.106-116. 2023.
- [3] Astuti, F, A. dan A. R. Fachudin. "Optimasi Turbin Air *Crossflow* Dengan Menggunakan Metode Taguchi," *Jurnal INTEKNA*, vol. 22, no. 1 p.60. 2022.
- [4] Prasetyo, A., S. I. Haryudo, A. I. Agung, dan U. T. Kartini. "Analisa Perubahan Daya Aktif Generator Serta Efisiensi Mekanik Generator yang Dipengaruhi Oleh Perubahan Kemiringan Sudut Sudu Turbin Berpenampang Pelat Datar Pada Kinerja Turbin Aliran *Crossflow* Poros Horizontal," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 11, no. 1, p.30-39, 2022.
- [5] Irawan, H. dan Mujiburrahman, "Kajian Eksperimental Pengaruh Jumlah Sudu Runner Turbin Air *Crossflow* Terhadap Unjuk Kerja Dengan Metode Taguchi," *Jurnal Teknik Mesin UNISKA*, vol. 3, no. 2, p. 80-85, 2018.
- [6] Arrianto, D. A., "Analisis Performansi Turbin Air *Crossflow* Terhadap Perubahan Sudut Sudu Dan Debit Aliran," Skripsi, Universitas Sriwijaya. Palembang, INDONESIA, 30662, 2018.

- [7] Lubis, I. S., R. Rahmadian, M. Widyartono, dan A. C. Hermawan, “Pengaruh Sistem Dan Rasio *Pulley* Terhadap Daya Listrik Pada Generator Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol, 12, no. 3, p. 40-48, 2023.
- [8] Sularso dan S. Kiyokatsu. Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin. Jakarta : PT Pradnya Paramita. 2004.
- [9] Alamsyah, M, S., B. Suprianto, Joko, dan Endryansyah, “Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Menggunakan Turbin *Crossflow* Dengan Perbandingan Variasi Sudut Sudu Terhadap Daya yang Dihasilkan,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol.13, no. 1, p. 2, 2024.
- [10] Koehuan, V, A., A, Sampealo, “Analisis Desain Turbin Air Tipe Aliran Silang (*Crossflow*) dan Aplikasinya di Desa Were I Kabupaten Ngada-NTT,” *LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana*, vol. 02, no. 01, 2015.
- [11] Anam, D. K. dan P. H. Adiwibowo. “Experimental Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Setengah Lingkaran Terhadap Daya Dan Efisiensi Turbin *Crossflow* Poros Horizontal,” *JTM*, vol 8, no. 1, p. 129-138. 2022.
- [12] Verma, V., V. K. Gaba, and S. Bhowmick, “An Experimental Investigation of the Performance of Cross-flow Hydro Turbines,” *Energy Procedia*, vol. 141, p.630-634. 2017.