

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH VARIASI SUDUT SUDU BERPENAMPANG SEGITIGA TERHADAP DAYA DAN EFISIENSI TURBIN PELTON

Muhammad Eka Abdul Gofar

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: muhammadeka.19015@mhs.unesa.ac.id

Priyo Heru Adiwibowo

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: priyoheruadiwibowo@unesa.ac.id

Abstrak

Keterbatasan pasokan listrik di Indonesia mendorong pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), salah satunya menggunakan turbin Pelton karena ekonomis dan fleksibel terhadap *head*. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan variasi sudut sudu berpenampang segitiga yang menghasilkan daya dan efisiensi mekanis tertinggi pada turbin Pelton. Metode eksperimen dilakukan dengan memvariasikan sudut sudu (60° , 90° , 120° , dan 180°) menggunakan 8 buah sudu. Pengujian menggunakan diameter nosel 25,4 mm, jarak semprot 50 mm, variasi kapasitas aliran air 001854 m^3/s , 002005 m^3/s , 002434 m^3/s dan 003114 m^3/s serta variasi pembebanan bertahap dari 5 kg hingga turbin berhenti. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut sudu 120° menghasilkan kinerja terbaik. Daya tertinggi mencapai **37,729 Watt** pada kapasitas aliran 003114 m^3/s dengan beban 25 kg. Sementara itu, efisiensi tertinggi sebesar **59,09%** diperoleh pada kapasitas aliran 002005 m^3/s dengan beban 10 kg. Sudut 120° optimal karena menghasilkan gaya hambat (*drag force*) yang lebih besar, sehingga mampu mengekstraksi energi aliran air secara maksimal.

Kata Kunci: Turbin Pelton, sudut sudu, sudu segitiga, Kinerja Turbin Pelton, Daya Turbin, Efisiensi Turbin

Abstract

Limited electricity supply in Indonesia drives the utilization of Micro-Hydro Power Plants (MHPP), with Pelton turbines being a viable option due to their economic viability and head flexibility. This study aims to determine the optimal angle of triangular-profile blades that yields the highest power and efficiency. An experimental method was conducted by varying the blade angles (60° , 90° , 120° , and 180°) using an 8-blade runner. Testing was performed with a 25.4 mm nozzle diameter, a 50 mm spray distance, water flow rate variations (001854 m^3/s , 002005 m^3/s , 002434 m^3/s and 003114 m^3/s) and incremental braking loads starting from 5 kg until the turbine stopped. The results showed that the 120° blade angle delivered the best performance. The highest power output reached **37.729 Watts** at a flow rate of 003114 m^3/s with a 25 kg load. Meanwhile, the maximum efficiency of **59.09%** was achieved at a flow rate of 002005 m^3/s , with a 10 kg load. The 120° angle proved optimal due to its higher drag force, which effectively extracted more energy from the water flow.

Keywords: Pelton Turbine, blade angle, triangular blade, Pelton turbine performance, turbine power, turbine efficiency.

PENDAHULUAN

Energi listrik telah menjadi kebutuhan primer yang sangat krusial dalam menopang aktivitas kehidupan modern sehari-hari. Di Indonesia, ketergantungan terhadap bahan bakar fosil atau minyak bumi untuk memenuhi pasokan listrik nasional masih sangat dominan, yakni mencapai 83% pada periode 2016–2022. Namun, pemanfaatan energi konvensional ini belum mampu menyelesaikan isu pemerataan elektrifikasi secara menyeluruh, mengingat masih terdapat daerah-daerah terpencil yang belum terjangkau oleh jaringan listrik utama. Guna mengatasi keterbatasan pasokan dan mencapai target optimasi bauran energi terbarukan dari 7% menjadi 23% pada tahun 2025, inovasi teknologi

pemanfaatan energi hijau yang bersih dan efisien mutlak diperlukan. Salah satu solusi alternatif yang sangat potensial untuk diaplikasikan pada daerah aliran sungai terpencil adalah Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH).

Secara prinsip, PLTMH mengonversi energi potensial dari aliran air sungai yang memiliki debit (Q) dan tinggi jatuh (*head*) tertentu menjadi energi kinetik, lalu diubah menjadi energi mekanik melalui putaran runner turbin sebelum dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Berdasarkan mekanisme kerjanya, turbin air diklasifikasikan menjadi turbin reaksi dan turbin impuls, di mana turbin Pelton merupakan salah satu jenis turbin impuls yang paling umum digunakan pada kondisi *head* menengah hingga tinggi dengan karakteristik debit air yang

relatif kecil. Turbin Pelton memanfaatkan daya semprot air bertekanan tinggi dari nosel (*nozzle*) untuk mendorong deretan sudu atau mangkok (*bucket*) yang terpasang pada lingkaran luar *runner*, menjadikannya sangat efisien untuk kondisi geografis tertentu.

Efisiensi dan performa daya mekanik yang dihasilkan turbin Pelton sangat bergantung pada konfigurasi geometri komponen utamanya, terutama nosel dan konstruksi sudu. Penelitian terdahulu oleh Fernanda dan Adiwibowo (2021) mengonfirmasi bahwa variasi diameter ujung nosel berpengaruh signifikan terhadap performa turbin, di mana efisiensi optimum sebesar 57,51% diperoleh pada kapasitas air 12 LPM dengan diameter nosel 12 mm dan beban 1000 gram. Di sisi lain, jumlah dan bentuk penampang sudu juga memegang peranan penting dalam menyerap gaya dorong aliran fluida secara maksimal. Afryzal dan Adiwibowo (2017) menemukan bahwa kerapatan antarsudu memengaruhi volume air yang masuk, di mana penggunaan 8 sudu datar menghasilkan daya optimal sebesar 21,84 Watt akibat jarak antarsudu yang ideal. Lebih lanjut, eksperimen oleh Cristiawan dkk. (2017) yang membandingkan penampang sudu setengah lingkaran, sirip, dan segitiga menunjukkan bahwa sudu berpenampang segitiga mampu menghasilkan putaran (RPM) yang paling optimal serta torsi yang baik, sehingga memberikan nilai efisiensi terbaik dibanding geometri lainnya. Optimasi sudut sudu dengan penampang segitiga juga telah diuji oleh Prasetyo dan Adiwibowo (2021) pada jenis turbin *crossflow*, yang menunjukkan bahwa sudut sudu 110° menghasilkan daya optimum sebesar 2,839 Watt karena lebar sudut yang lebih kecil mampu meminimalkan hambatan aliran balik air.

Meskipun kajian mengenai pengaruh geometri nosel dan bentuk dasar penampang sudu telah banyak dieksplorasi, studi mendalam yang memfokuskan pada variasi sudut kemiringan sudu spesifik berpenampang segitiga pada jenis turbin Pelton masih sangat terbatas. Padahal, penentuan sudut kemiringan sudu yang tepat sangat krusial untuk memastikan arah vektor gaya pancaran air dari nosel jatuh tegak lurus menumbuk permukaan sudu segitiga secara kontinu, sehingga meminimalkan kerugian energi kinetik yang terbuang.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi eksperimental guna mengetahui pengaruh variasi sudut sudu berpenampang segitiga terhadap daya mekanik dan efisiensi yang dihasilkan pada prototipe turbin Pelton. Variasi sudut sudu yang diuji dalam penelitian ini meliputi 60° , 90° , 120° , dan 180° . Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah yang signifikan dalam pengembangan desain turbin Pelton skala mikro-piko hidro yang lebih efisien, sekaligus menjadi referensi empiris sebagai media pembelajaran di bidang teknologi konversi energi alternatif.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen murni guna menguji performa prototipe turbin Pelton melalui variasi sudut sudu berpenampang segitiga. Pengujian dilakukan secara sistematis dengan mengamati dampak

parameter bebas terhadap parameter terikat di bawah kondisi kontrol yang konstan.

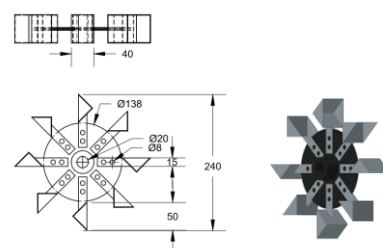
1. Variabel Bebas: Sudut kemiringan sudu berpenampang segitiga sebesar 60° , 90° , 120° , dan 180°
2. Variabel Terikat: Gaya pengereman (F), torsi turbin (T), putaran poros turbin (η), daya turbin (P_t), dan efisiensi turbin (η)
3. Variabel Kontrol: Fluida kerja berupa air bersih, diameter *runner* turbin konstan sebesar 246 mm, jumlah sudu sebanyak 8 buah dengan penampang berbentuk segitiga, diameter ujung nosel konstan pada 8 mm dengan jarak semprot (*nozzle-to-bucket distance*) sebesar 50 mm, serta variasi kapasitas aliran air (Q) yang diatur pada empat tingkatan: $001854 \text{ m}^3/\text{s}$, $002005 \text{ m}^3/\text{s}$, $002434 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $003114 \text{ m}^3/\text{s}$. Pembebanan diberikan bertahap menggunakan beban mati mulai dari 5 kg hingga turbin berhenti berputar.

ALAT, BAHAN DAN INSTRUMEN

Instalasi pengujian pada penelitian eksperimental ini dibagi menjadi tiga komponen utama, yaitu peralatan eksperimen (komponen mekanis utama), bahan/fluida kerja, serta instrumen pengukuran (instrumentasi).

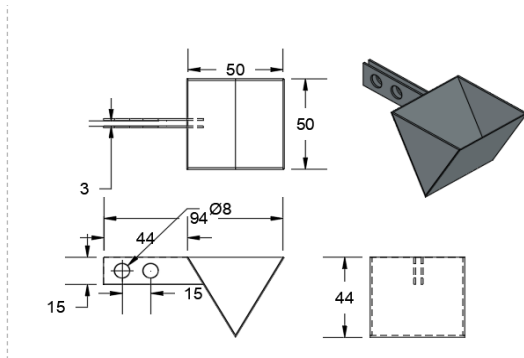
1. peralatan eksperimen dan bahan

A. **Unit Roda Jalan (*Runner*):** Menggunakan piringan (*disc*) logam penahan berdiameter luar konstan sebesar 246 mm yang berfungsi sebagai tempatudukan sudu-sudu turbin Pelton. Poros *runner* ditopang oleh bantalan *pillow block* untuk meminimalkan gesekan mekanis selama berputar secara horizontal.

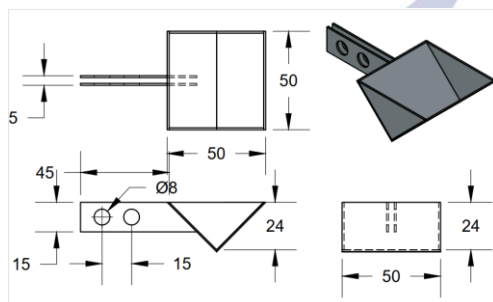


Gambar 1. Desain Runner

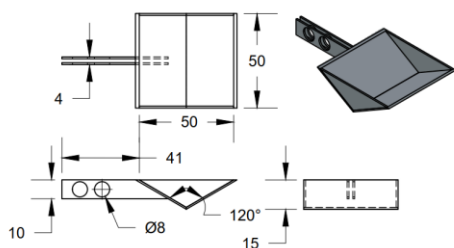
B. **Sudu Segitiga (Spesimen Uji):** Komponen sudu dirancang dengan penampang berbentuk segitiga berjumlah 8 buah. Bahan sudu menggunakan material kokoh yang dibentuk presisi ke dalam empat variasi sudut belok permukaan, yaitu 60° , 90° , 120° , dan 180° , berikut untuk desain dari sudu yang di gunakan.



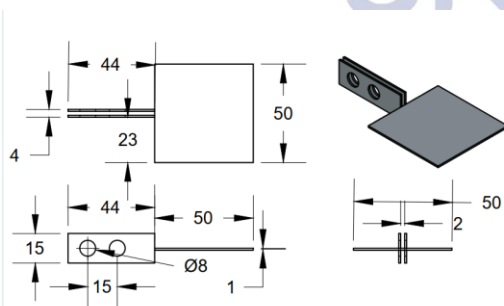
Gambar 2. Desain Sudu 60°



Gambar 3. Desain sudu 90°



Gambar 4. Desain sudu 120°



Gamabr 5. Desain Sudu 180°

- C. **Sistem Sirkulasi Fluida:** Terdiri dari bak penampung air utama (*reservoir*), saluran pipa hisap (*suction*), katup kendali aliran (*globe valve* ukuran 4 inci) untuk mengatur variasi debit, pipa dorong distribusi (*discharge*), serta struktur rumah turbin

(*housing*) berbahan transparan/plat besi untuk mengurung percikan air pasca-tumbukan.

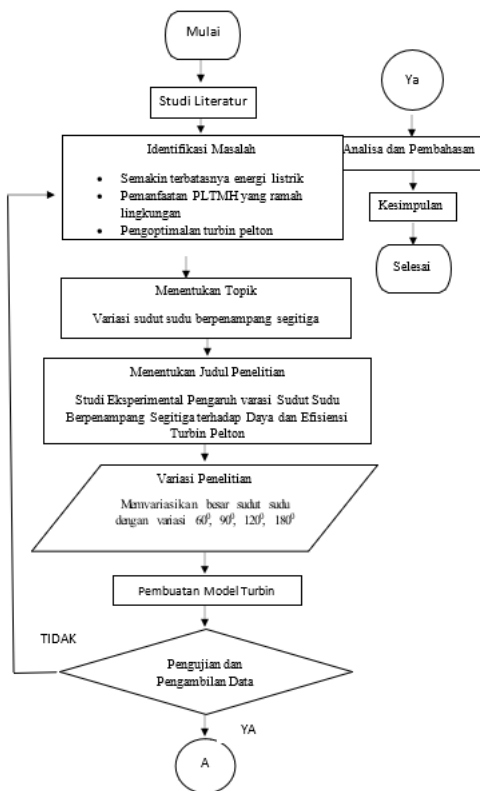
- D. **Fluida Kerja (Bahan):** Menggunakan air bersih (*aquades/tap water*) sebagai fluida kerja penggerak dengan massa jenis rata-rata $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$

2. Instrument penelitian

Guna memperoleh data parameter unjuk kerja turbin secara akurat, digunakan beberapa instrumen pengukuran dengan spesifikasi teknis sebagai berikut:

- Pompa Sentrifugal (Massimo MS-300-4"):** Berperan sebagai penggerak fluida untuk mensimulasikan *head* dan kapasitas aliran konstan. *Spesifikasi:* Daya output 2,2 kW (3,0 HP), daya hisap maks. 7 meter, total *head* maks. 16 meter, kapasitas aliran maks. 1083 liter/menit, diameter pipa hisap dan dorong sebesar 4 inci.
- Digital Ultrasonic Flowmeter (SiteLab SL1168):** Dipasang pada pipa distribusi non-invasif untuk mengukur kapasitas aliran air (*Q*) secara *real-time*. *Spesifikasi:* Rentang aliran (*flow range*) 0–12 m/s, akurasi $\pm 1\%$, repetibilitas $\pm 3\%$, output sinyal 4–20 mA, konsumsi daya 2 Watt.
- Pressure Gauge (Duro United Instruments):** Instrumen analog yang dipasang tepat di bagian pipa sebelum nosel untuk mengukur tekanan kerja air (*p*), *Spesifikasi:* Ukuran dial 4,5 inci, rentang ukur 0–30 PSI (ekuivalen dengan 0–230 kPa).
- Nosel (Nozzle):** Menggunakan nosel dengan diameter ujung keluaran konstan sebesar 8 mm, ditempatkan pada jarak semprot tetap (*nozzle-to-bucket distance*) sebesar 50 mm mengarah tegak lurus ke pusat mangkok sudu.
- Digital Tachometer (Krisbow KW00056):** Alat ukur berbasis optik (*non-contact laser*) untuk memantau kecepatan putaran poros turbin (*n*). *pesifikasi:* Jarak deteksi laser 50–500 mm, rentang uji *non-contact* 2–99.999 RPM, tingkat akurasi $\pm (0,05 \% \pm 1 \text{ digit})$.
- Sistem Pembebanan Prony Brake:** Mekanisme pengereman mekanis menggunakan sabuk gesek yang dilingkarkan pada poros turbin untuk memberikan torsi lawan. Gaya pengereman dibaca melalui **Neraca Pegas Digital** (kapasitas 0–40 kg, dilengkapi fungsi *tare* otomatis) yang dikaitkan pada ujung lengan pengereman, dikombinasikan dengan variasi **Beban Mati** bertahap mulai dari 5 kg, 10 kg, 15 kg, hingga 25 kg.

Rancangan penelitian



HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Desain Eksperimen dan Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen murni guna menguji performa prototipe turbin Pelton melalui variasi sudut sudu berpenampang segitiga. Pengujian dilakukan secara sistematis dengan mengamati dampak parameter bebas terhadap parameter terikat di bawah kondisi kontrol yang konstan.

- Variabel Bebas:** Sudut kemiringan sudu berpenampang segitiga sebesar 60° , 90° , 120° , dan 180°
- Variabel Terikat:** Gaya pengereman (F), torsi turbin (T), putaran poros turbin (n), daya turbin (P_t), dan efisiensi turbin (η)
- Fluida kerja berupa air bersih, diameter *runner* turbin konstan sebesar 246 mm, jumlah sudu sebanyak 8 buah dengan penampang berbentuk segitiga, diameter ujung nosel konstan pada 8 mm dengan jarak semprot (*nozzle-to-bucket distance*) sebesar 50 mm, serta variasi kapasitas aliran air (Q) yang diatur pada empat tingkatan: $0,001854 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,002005 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,002434 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $0,003114 \text{ m}^3/\text{s}$. Pembebanan diberikan bertahap menggunakan beban mati mulai dari 5 kg hingga turbin berhenti berputar

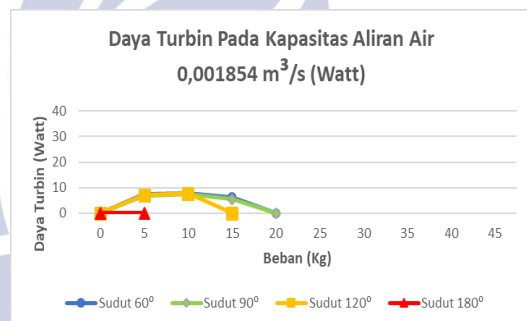
2. Karakteristik Hubungan Kapasitas Aliran dan Pembebanan terhadap Daya Turbin

Pengujian empiris dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi kapasitas aliran air (Q) dan beban pengereman terhadap daya turbin (P_t) pada empat variasi sudut sudu segitiga 60° , 90° , 120° , dan 180° . Berdasarkan data yang diperoleh, kapasitas aliran air terbukti berbanding lurus dengan peningkatan daya yang dihasilkan turbin; semakin besar debit fluida yang menumbuk sudu, maka semakin tinggi transfer energi kinetik yang dikonversi menjadi energi mekanis poros.

Tabel 1. Kapasitas Aliran Air

Kapasitas Aliran Air						
No	Sudut Bukaan Katup ($^\circ$)	Kapasitas Aliran				
		Kapasitas Aliran 1 (l/s)	Kapasitas Aliran 2 (l/s)	Kapasitas Aliran 3 (l/s)	Rata-Rata Kapasitas Aliran (l/s)	Rata-Rata Kapasitas Aliran (m^3/s)
1	90	1,847	1,824	1,878	1,854	0,001854
2	100	2,000	2,008	2,007	2,005	0,002005
3	110	2,469	2,455	2,379	2,434	0,002434
4	120	3,131	3,159	3,052	3,114	0,003114

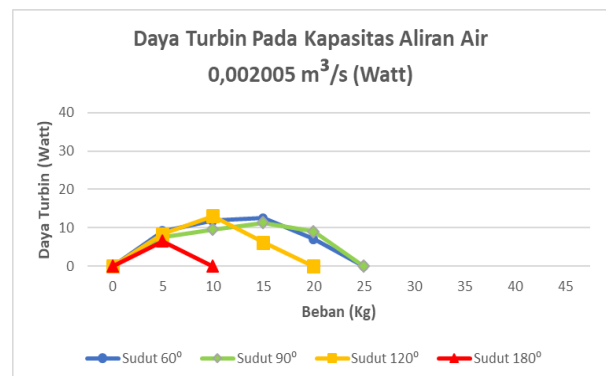
Secara spesifik, karakteristik daya turbin pada setiap tingkatan kapasitas aliran menunjukkan tren yang bervariasi:



Gambar 6. Grafik daya turbin pada kapasitas aliran $0,001854 \text{ m}^3/\text{s}$ (Watt)

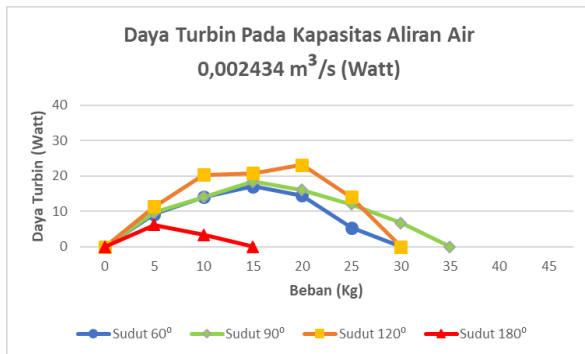
Pada kapasitas aliran air paling rendah $0,001854 \text{ m}^3/\text{s}$, unjuk kerja terbaik diraih oleh variasi sudu sudut 60° pada pembebanan 10 kg dengan daya maksimum sebesar 7,720 Watt

Contoh gambar grafik di bawah ini:



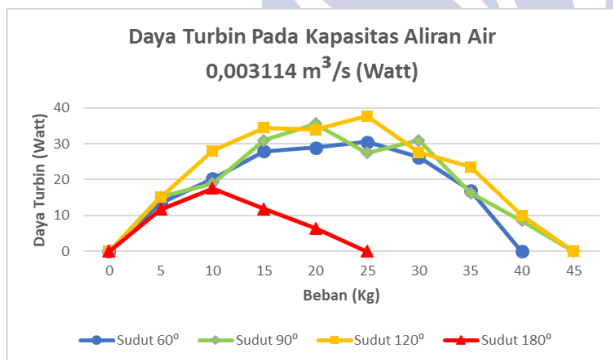
Gambar 7. Grafik daya turbin pada kapasitas aliran $0,002005 \text{ m}^3/\text{s}$ (Watt)

Pada kapasitas aliran air $0,002005 \text{ m}^3/\text{s}$, daya tertinggi bergeser ke variasi sudu sudut 20° dengan pencapaian 13,121 Watt pada pembebanan 10 kg.



Gambar 8. Grafik daya turbin pada kapasitas aliran $0,002434 \text{ m}^3/\text{s}$ (Watt)

Pada kapasitas aliran air $0,002434 \text{ m}^3/\text{s}$, variasi sudu sudut 120° kembali unggul secara signifikan dengan menghasilkan daya maksimum sebesar 23,117 Watt pada pembebanan yang lebih tinggi, yaitu 20 kg.



Gambar 9. Grafik daya turbin pada kapasitas aliran $0,003114 \text{ m}^3/\text{s}$ (Watt)

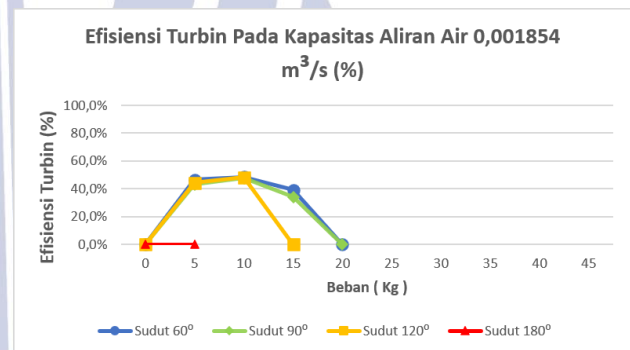
Pada kapasitas aliran air tertinggi $0,003114 \text{ m}^3/\text{s}$, variasi sudu sudut 120° mencatatkan keluaran daya mekanis paling besar dalam keseluruhan eksperimen ini, yakni mencapai 37,729 Watt pada pembebanan pengereman 25 kg.

Secara umum, fenomena mekanika fluida yang teramati menunjukkan bahwa pada rentang beban awal (0 hingga 10 kg) dengan kapasitas aliran tinggi, seluruh variasi sudut sudu mengalami peningkatan daya yang relatif konstan secara bersama-sama. Namun, setelah melewati ambang batas pembebanan tersebut, pemisahan performa mulai terjadi akibat perbedaan *drag force* (gaya seret balik) dan *lift force* yang diterima oleh masing-masing geometri permukaan sudu.

3. Karakteristik Hubungan Kapasitas Aliran dan Pembebanan terhadap Efisiensi Turbin

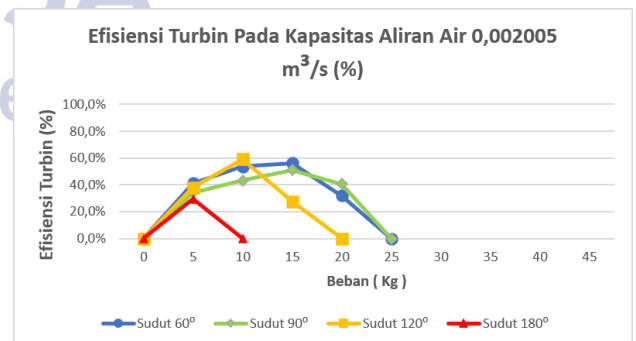
Analisis efisiensi turbin Pelton (η) ditujukan untuk melihat sejauh mana rasio daya mekanis yang diekstrak poros turbin dibandingkan dengan daya potensial kinetik air (*fluid power*) yang disemburkan oleh nosel. Hasil perhitungan menunjukkan tren menarik, di mana peningkatan kapasitas aliran air tidak selalu linier dengan kenaikan efisiensi sistem, karena adanya faktor kerugian mekanis, turbulensi fluida, dan batas optimal penyerapan momentum oleh sudu.

Profil efisiensi tertinggi pada masing-masing kapasitas aliran air terangkum sebagai berikut:



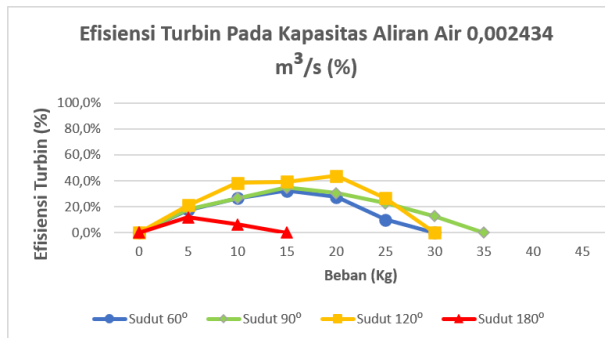
Gambar 10. Grafik daya turbin pada kapasitas aliran $0,001854 \text{ m}^3/\text{s}$ (%)

Kapasitas aliran $0,001854 \text{ m}^3/\text{s}$ (%), Efisiensi puncak dicapai oleh sudu sudut 60° pada beban 10 kg sebesar 48,59%



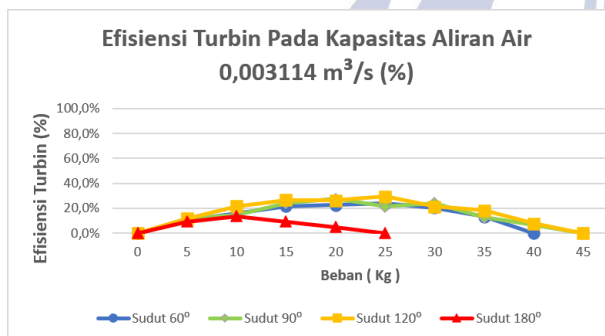
Gambar 11. Grafik daya turbin pada kapasitas aliran $0,002005 \text{ m}^3/\text{s}$ (%)

Kapasitas aliran $0,002005 \text{ m}^3/\text{s}$ (%) Efisiensi puncak melonjak hingga menyentuh titik tertinggi dalam penelitian ini, diraih oleh sudu sudut 120° pada beban 10 kg sebesar 59,05%



Gambar 12. Grafik daya turbin pada kapasitas aliran 0,002434 m³/s (%)

Kapasitas aliran 0,002434 m³/s (%) Efisiensi puncak dicapai oleh sudu sudut 120° pada beban 20 kg sebesar 43,77%



Gambar 13. Grafik daya turbin pada kapasitas aliran 0,003114 m³/s (%)

Kapasitas aliran 0,003114 m³/s (%) Efisiensi puncak turun menjadi 29,23% yang dicapai oleh sudu sudut 120° pada beban 25 kg.

4. Pembahasan Komparatif Geometri Sudu Berpenampang Segitiga

Melalui perbandingan menyeluruh terhadap keempat konfigurasi geometri sudu, variasi sudu dengan sudut 120° terbukti memberikan performa rata-rata yang paling unggul di hampir seluruh rentang pengujian kapasitas aliran air. Keunggulan sudu 120° ini dikarenakan interaksi hidrodinamika yang optimal antara semburan fluida (*water jet*) dan profil penampang segitiga sudu.

Pada sudut 120° dengan pembebanan yang tepat (misalnya pada kombinasi debit 0,002005 m³/s dan beban 10 kg), terjadi keseimbangan momentum kinetik yang sangat baik antara daya fluida masuk dan daya mekanis poros turbin. Luas permukaan efektif dan kemiringan sudu 120° mampu menangkap gaya seret (*drag force*) dari jet air secara sempurna, sekaligus meminimalkan gaya hambat balik atau turbulensi sekunder saat air meninggalkan mangkok sudu (*discharge fluid*).

Sebaliknya, pada variasi sudut sudu yang terlalu kecil (60°), air cenderung tertahan di dalam sudu lebih lama

sehingga menimbulkan akumulasi massa fluida (*flooding effect*) yang justru mengerem putaran *runner*. Di sisi lain, pada sudut yang terlalu lebar (180°), sebagian energi kinetik air terbuang karena sudut belok aliran fluida kurang tajam untuk menghasilkan gaya impuls yang maksimal. Hal ini mengonfirmasi bahwa untuk mengoptimalkan efisiensi sistem turbin Pelton piko-hidro berpenampang segitiga, diperlukan sinkronisasi yang presisi antara kapasitas aliran fluida, pembebanan torsi mekanis, serta geometri kelengkungan sudut sudu.

Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan analisis komparatif terhadap unjuk kerja prototipe turbin Pelton horizontal berpenampang segitiga, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

- Pengaruh Variasi Sudu terhadap Daya Turbin:** Variasi sudut belok sudu berpenampang segitiga terbukti berpengaruh signifikan terhadap daya mekanis yang dihasilkan poros turbin. Kapasitas aliran air (Q) berbanding lurus dengan daya turbin; di mana daya tertinggi pada keseluruhan penelitian ini berhasil dicapai oleh variasi sudu sudut 120° pada kapasitas aliran maksimum 0,003114 m³/s (%) dengan pembebanan 25 kg, yaitu sebesar 37,729 Watt
- Pengaruh Variasi Sudu terhadap Efisiensi Turbin:** Perubahan kapasitas aliran air tidak selalu berbanding lurus dengan efisiensi sistem karena memerlukan sinkronisasi momentum yang tepat antara daya air dan pembebanan. Efisiensi turbin tertinggi (puncak) dalam eksperimen ini diraih oleh variasi sudu sudut 120° pada kapasitas aliran air sedang sebesar 0,002005 m³/s dengan kondisi pembebanan 10 kg, yang menghasilkan efisiensi maksimal sebesar 59,05%.
- Geometri Sudu Segitiga Optimal:** Secara keseluruhan, variasi sudu dengan sudut kemiringan 120° menunjukkan performa rata-rata yang paling unggul dan stabil di hampir setiap tingkatan kapasitas aliran air dibandingkan dengan sudut 60°, 90° dan 180°. Hal ini dikarenakan karakteristik geometri sudut 120° mampu menangkap gaya seret (*drag force*) semburan nosel secara optimal sekaligus meminimalkan efek turbulensi balik pada mangkok sudu.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak Universitas yang telah menyediakan fasilitas laboratorium, serta kepada para dosen pembimbing Tugas Akhir atas arahan, bimbingan, dan masukan ilmiah yang sangat berharga selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini selesai. Apresiasi juga ditujukan kepada rekan-rekan sesama mahasiswa di Laboratorium Teknik Mesin yang telah memberikan dukungan teknis dan bantuan selama pengambilan data eksperimental berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Afryzal, N. R., & Adiwibowo, P. H. (2017). Uji Eksperimental Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Reaksi Aliran Vortex Dengan Sudu Berpenampang Plat Datar. *Jurnal Teknik Mesin*, 5(2), 147–157.
- Arisandy, D., & Romadhon, R. (2020). Analisis pengaruh variasi bentuk sudu terhadap daya dan efisiensi pada turbin pelton skala mikrohidro. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 11(2), 245–253.
- Bono, & Suwarti. (2019). Variasi Jumlah Sudu Dan Modifikasi Bentuk Nosel Pada Turbin Turgo Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro. *Eksergi Jurnal Teknik Energi*, 15(2), 45–52.
- Elbatran, A. H., Yakoob, O. B., Ahmed, Y. M., & Shabara, Y. M. (2015). Operation, performance and economic analysis of low head micro-hydropower turbines for rural and remote areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 40–50.
- Fadli, M., & Syarief, A. (2019). Studi eksperimental pengaruh sudut kemiringan sudu mangkok terhadap kinerja turbin pelton pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH). *Jurnal Teknik Mesin Universitas Lambung Mangkurat*, 4(1), 12–19.
- Fernanda, A. D., & Adiwibowo, P. H. (2021). Pengaruh Variasi Diameter Ujung Nossel Terhadap Daya Dan Efisiensi Turbin Pelton. *Jurnal Teknik Mesin*, 9(3), 35–42.
- Hidayat. (2017). *Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)*. Bandung: Penerbit ITB.
- Mafruddin, & Irawan, D. (2020). *Turbin Impuls* (Edisi 1, Vol. 1). CV. Laduny Alifatama.
- Majid, A., Danus, M., & Yuniarti, E. (2019). Pemanfaatan Pompa Air Sebagai Prime Over Pembangkit Listrik Alternatif Skala Rumah Tangga. *Jurnal Surya Energy*, 3(2), 58–64.
- Nurudin, M., & Adiwibowo, P. H. (2022). Studi Eksperimental Pengaruh Sudu Berpenampang V Terhadap Daya Dan Efisiensi Turbin Crossflow Poros Horizontal. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(2), 129–140.
- Prasetyo, A., & Nugroho, S. (2021). Pengaruh variasi geometri penampang sudu terhadap torsi dan efisiensi turbin pelton skala laboratorium. *Jurnal Teknik Mesin: SINERGI*, 19(1), 55–64.
- Putra, H., Mugisidi, Yusuf, M., & Heriyani, O. (2016). Pengaruh Variasi ukuran Diameter Nozzel Terhadap Daya dan Efisiensi kincir Air Sudu Datar. *Jurnal Teknobiz*, 6(3), 112–118.
- Rohermanto, A. (2007). Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Sebagai Sistem Andal Konversi Energi. *Jurnal Teknik Elektro*, 4(1), 22–29.
- Saputra, W., & Setiawan, I. (2022). Optimasi unjuk kerja turbin pelton melalui variasi sudut pancaran nosel dan bentuk mangkok sudu. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 15(2), 89–96.
- Sarjono. (2021). Pengaruh Variasi Diameter dan Jarak Nozel Terhadap Daya dan Efisiensi Turbin Pelton. *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin*, 14(2), 181–185.
- Sugiharto, A. (2018). PLTMH Sebagai Alternatif Pembangkit Listrik Ramah Lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 19(1), 75–82.
- Sugiyono. (2013). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Utomo, B. S., & Wahyudi, S. (2023). Analisis eksperimental pengaruh variasi sudut kelengkungan sudu segitiga terhadap efisiensi turbin implus skala mikro. *Jurnal Prestasi Teras: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 8(3), 112–120.

- Wicaksana, M. Y. A., & Adiwibowo, P. H. (2023). Studi Eksperimental Pengaruh Kedalaman Sudu Mangkuk Tunggal Terhadap Daya Dan Efisiensi Turbin Pelton. *Jurnal Teknik Mesin*, 11(3), 1–10.
- Yani, A. (2017). Rancang Bangun Alat Praktikum Turbin Air Dengan Pengujian Bentuk Sudu Terhadap Torsi Dan Daya Turbin Yang Dihasilkan. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 6(1), 88–95.

