

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH VARIASI RASIO TINGGI SUDU SEGITIGA V TERPANCUNG POSISI MELINTANG TERHADAP DAYA DAN EFISIENSI

Melandry Ahmad Fauzi

Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: melandry.22058@mhs.unesa.ac.id

Priyo Heru Adiwibowo

Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: priyoheruadiwibowo@unesa.ac.id

ABSTRAK

Penggunaan energi fosil di Indonesia yang masih cukup tinggi menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan sehingga mendorong pentingnya pengembangan energi terbarukan secara berkelanjutan. Salah satu sumber energi yang memiliki potensi besar namun belum dimanfaatkan secara optimal adalah energi air dengan kapasitas sekitar 75.000 MW. Pemanfaatan energi tersebut dapat diterapkan melalui Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), terutama pada daerah pedesaan yang memiliki keterbatasan debit air. Turbin Pelton merupakan salah satu jenis turbin yang sesuai digunakan pada kondisi head tinggi dan debit kecil, tetapi bentuk sudu konvensional tipe mangkuk masih kurang efektif saat bekerja pada debit rendah sehingga memengaruhi performa turbin. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi rasio tinggi sudu segitiga V terpancung posisi melintang terhadap daya dan efisiensi turbin Pelton. Proses pengujian dilakukan di laboratorium menggunakan runner berdiameter 246 mm dan nozzle berdiameter 25,4 mm dengan variasi bukaan globe valve sebesar 90°, 100°, 110°, dan 120°. Variasi rasio ketinggian sudu yang digunakan meliputi 0, 0,0162, 0,0325, dan 0,0487 dengan konfigurasi delapan sudu bersudut 110°. Penelitian ini juga menggunakan variasi kapasitas aliran sebesar 0,00229 m³/s, 0,00260 m³/s, 0,00328 m³/s, dan 0,00449 m³/s dengan kecepatan aliran antara 4,517 m/s hingga 8,669 m/s. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, variasi rasio 0,0487 menunjukkan performa terbaik dibandingkan variasi lainnya. Daya maksimum yang dihasilkan mencapai 59,756 Watt pada kapasitas aliran 0,00449 m³/s dengan pembebanan 50 kg, sedangkan efisiensi tertinggi sebesar 52,46% diperoleh pada kapasitas aliran 0,00229 m³/s dengan pembebanan 15 kg.

Kata kunci : Energi terbarukan, PLTMH, turbin Pelton, sudu V terpancung, debit rendah, efisiensi turbin, konversi energi.

ABSTRACT

Indonesia's dependence on fossil-based energy continues to create significant environmental problems and highlights the urgent need to accelerate the development of renewable energy sources. One of the renewable resources with considerable potential is hydropower, which has an estimated capacity of approximately 75,000 MW, although its utilization remains far from optimal. In this context, Micro Hydro Power Plants (MHPPs) are considered an appropriate solution, particularly for rural areas with limited water discharge availability. The Pelton turbine is widely recognized for its effectiveness under high head and low discharge conditions; however, the conventional bowl-shaped bucket design still exhibits limitations when operating at low flow rates, resulting in less efficient energy conversion. Therefore, this study aims to investigate the effect of truncated V-shaped transverse bucket height ratio variations on the power output and efficiency of a Pelton turbine. The experimental study was conducted in a laboratory using a turbine equipped with a runner diameter of 246 mm and a nozzle diameter of 25.4 mm, with globe valve openings varied at 90°, 100°, 110°, and 120°. The bucket height ratios tested were 0, 0.0162, 0.0325, and 0.0487 using an eight-bucket configuration with a bucket angle of 110°. In addition, the experiment employed flow capacities of 0.00229 m³/s, 0.00260 m³/s, 0.00328 m³/s, and 0.00449 m³/s, with flow velocities ranging from 4.517 m/s to 8.669 m/s. Based on the experimental and analytical results, the 0.0487 ratio demonstrated the best overall performance among all tested variations. The highest power output reached 59.756 Watts at a flow capacity of 0.00449 m³/s with a loading condition of 50 kg, while the maximum efficiency of 52.46% was achieved at a flow capacity of 0.00229 m³/s with a 15 kg load.

Keywords: renewable energy, micro hydro power plant, Pelton turbine, truncated V-bucket, low discharge, turbine efficiency, energy conversion

PENDAHULUAN

Konsumsi energi fosil di Indonesia yang terus meningkat menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan serta memperkuat urgensi pengembangan energi terbarukan. Pertumbuhan ekonomi, urbanisasi, dan jumlah penduduk menyebabkan kebutuhan energi nasional terus bertambah, sementara sebagian besar pasokan energi masih berasal dari minyak bumi, gas alam, dan batu bara. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar adalah energi air dengan kapasitas mencapai sekitar 75.000 MW, namun tingkat pemanfaatannya masih relatif rendah. Dalam upaya mendukung penyediaan energi berkelanjutan, Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) menjadi solusi yang tepat, khususnya bagi wilayah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik utama. Sistem ini memanfaatkan aliran air berskala kecil untuk menghasilkan energi listrik dengan biaya operasional rendah dan ramah lingkungan. Turbin Pelton merupakan salah satu turbin yang banyak digunakan pada PLTMH karena memiliki efisiensi tinggi pada kondisi head besar dan debit kecil. Namun, sudu konvensional berbentuk mangkuk masih kurang optimal dalam menangkap aliran air pada debit rendah. Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu, modifikasi bentuk sudu terbukti mampu meningkatkan daya dan efisiensi turbin. Oleh sebab itu, penelitian ini mengembangkan sudu segitiga V terpancung posisi melintang guna memperbaiki distribusi aliran air, mengurangi turbulensi, dan meningkatkan konversi energi. Modifikasi tersebut diharapkan mampu menghasilkan performa turbin yang lebih stabil dan efisien, terutama pada kondisi debit rendah yang umum dijumpai pada sistem PLTMH di daerah pedesaan.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk menganalisis hubungan antara variabel yang diteliti melalui pengujian secara langsung di laboratorium. Metode eksperimen dipilih karena mampu menunjukkan pengaruh suatu variabel terhadap variabel lainnya secara terukur dan sistematis. Dalam penelitian ini dilakukan variasi rasio tinggi sudu segitiga V terpancung posisi melintang terhadap diameter luar turbin guna mengetahui pengaruhnya terhadap performa daya dan efisiensi turbin Pelton. Proses pengujian dilakukan menggunakan perangkat uji yang telah disiapkan sesuai kondisi penelitian di laboratorium. Pengambilan data dilakukan pada setiap variasi sudu dengan menjaga parameter tertentu tetap konstan, seperti debit aliran air dan tinggi head, sehingga hasil pengujian dapat dianalisis secara objektif, terarah, dan memiliki tingkat akurasi yang baik.

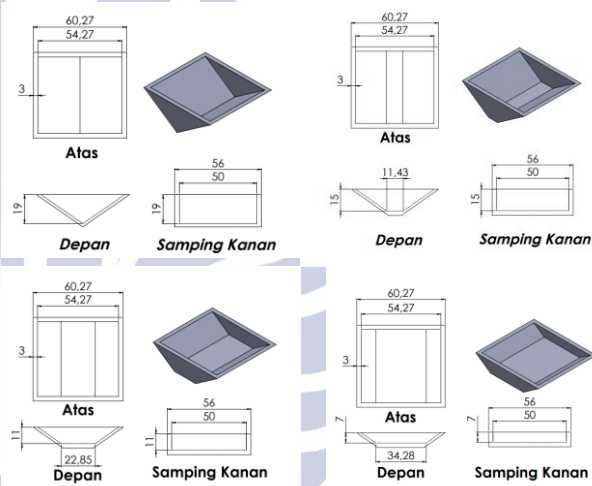
TEMPAT DAN WAKTU PENELITIAN

Penelitian dengan judul Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Rasio Tinggi Sudu Segitiga V Terpancung Posisi Melintang terhadap Daya dan Efisiensi

Turbin Pelton dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Fluida Gedung A.8 lantai 2 Fakultas Teknik Universitas Negeri Surabaya. Pelaksanaan penelitian dimulai setelah seminar proposal tugas akhir dinyatakan disetujui dan berlangsung hingga seluruh proses pengambilan data, pengujian, serta analisis hasil penelitian selesai dilakukan sesuai kebutuhan penelitian.

Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang memberikan pengaruh atau menyebabkan perubahan terhadap variabel terikat (dependen). Pada penelitian ini, variabel bebas yang digunakan berupa variasi rasio tinggi sudu segitiga V terpancung posisi melintang terhadap diameter luar turbin Pelton. Variasi tersebut diterapkan pada sudu dengan tinggi pemotongan sebesar 0 mm, 4 mm, 8 mm, dan 12 mm, sedangkan diameter luar turbin yang digunakan tetap sebesar 246 mm.



Gambar 1. Desain sudu variasi rasio

Variabel Terikat

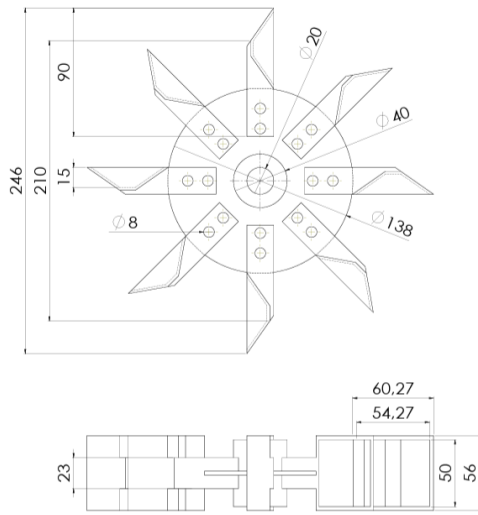
Variabel terikat dalam penelitian ini adalah daya dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin Pelton sebagai hasil dari perlakuan pada variabel bebas.

Variabel Kontrol

Pada penelitian kali ini, agar pokok pembahasan sesuai serta fokus terhadap pada judul yang diberikan, maka Penulis memberi batasan masalah, diantaranya :

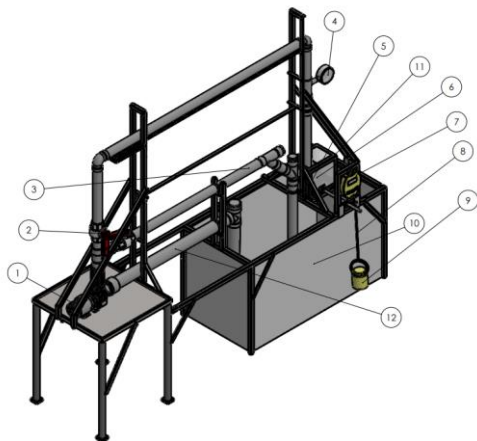
1. Fluida kerja yang digunakan adalah air.
2. Pada penelitian ini menggunakan kapasitas aliran sebesar 0,00229 m³/s, 0,00260 m³/s, 0,00328 m³/s, 0,00449 m³/s, dan kecepatan aliran sebesar 4,517 m/s, 5,127 m/s, 6,474m/s, 8,669 m/s.
3. Diameter ujung *nozzle* sebesar 25,4 mm dengan jarak semprot *nozzle* 50 mm.
4. Penelitian ini tidak membahas material yang digunakan pada turbin.
5. Penelitian ini membahas *prototype* turbin pelton dengan poros horizontal.

- Pembebanan sebesar 5 kg, 10 kg, 15 kg, dan seterusnya hingga turbin berhenti berputar.
- Menggunakan *runner* berdiameter luar turbin 246 mm.
- Menggunakan sudu berbentuk segitiga V terpancung posisi melintang dengan variasi rasio tinggi sudu 0, 0,0162, 0,0325, 0,0487 dan menggunakan variasi jumlah sudu yaitu 8 Sudu dengan sudut 110°.



Gambar 2. Desain *Runner*

Peralatan dan Instrumen Penelitian

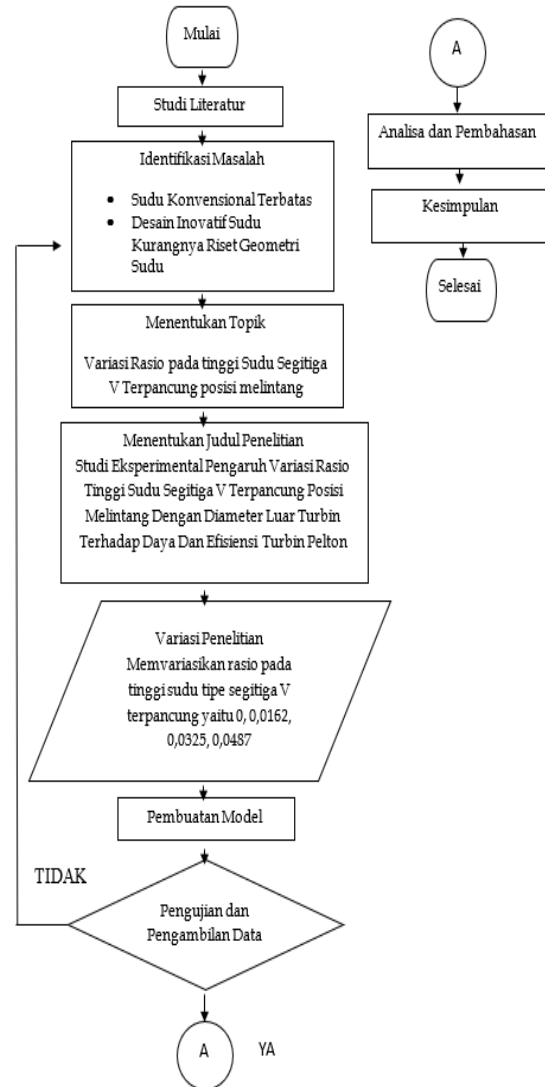


Gambar 3. Desain Rancangan PLTMH

Keterangan:

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1. Pompa | 7. Neraca |
| 2. Katup | 8. <i>Prony Brake</i> |
| 3. Pipa pembuangan | 9. Beban |
| 4. <i>Pressure Gauge</i> | 10. Bak Penampung Air |
| 5. Nosel | 11. Rumah Turbin |
| 6. Turbin Pelton | 12. Pipa Hisap |

Diagram alir penelitian



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan informasi yang diperlukan guna mendukung pencapaian tujuan penelitian. Tujuan tersebut dirumuskan dalam bentuk hipotesis yang masih bersifat sementara sebagai jawaban atas permasalahan penelitian. Jenis data yang diperoleh ditentukan oleh variabel-variabel yang tercantum dalam hipotesis yang diajukan. Adapun teknik pengumpulan data dilakukan melalui proses pengukuran atau pengujian terhadap objek penelitian, kemudian hasilnya dicatat secara sistematis untuk dianalisis lebih lanjut.

Teknik Analisa Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan sebagai proses sistematis untuk mengolah hasil pengukuran menjadi informasi yang mudah dipahami, sehingga dapat digunakan dalam mendukung pengambilan keputusan serta penyelesaian permasalahan penelitian. Metode yang digunakan adalah analisis deskriptif kualitatif yang bertujuan untuk memberikan penjelasan

dan gambaran terhadap fenomena yang terjadi selama proses eksperimen berlangsung. Pendekatan ini dipilih karena mampu menggambarkan hubungan antar variabel serta kejadian yang muncul selama pengujian. Data yang diperoleh kemudian disusun secara terstruktur dalam bentuk tabel, dihitung secara teoritis, serta disajikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah pemahaman. Penyajian tersebut bertujuan untuk memperjelas karakteristik kinerja alat, hubungan antar variabel yang diteliti, serta fenomena yang terjadi selama proses pengujian berlangsung.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan melalui proses pengukuran dan perhitungan langsung. Debit aliran air diukur menggunakan *V-Notch Weir*, beban ditentukan dengan neraca, dan putaran turbin dicatat memakai tachometer. Setiap parameter diukur sebanyak tiga kali untuk memperoleh hasil yang lebih akurat, kemudian dianalisis menggunakan rumus yang sesuai. Seluruh data yang diperoleh disajikan dalam bentuk tabel dan grafik agar memudahkan proses perbandingan serta analisis terhadap setiap variasi yang diuji. Perhitungan data dilakukan berdasarkan rumus yang digunakan dalam penelitian ini :

- Kapasitas Aliran Air (Q)

$$Q = c_d \left(\frac{8}{15}\right) \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{\frac{5}{2}} \dots\dots (1)$$

Dengan:
 Q = Kapasitas Aliran Air (m³/s)
 Cd = *Coefficient of discharge*
 g = Gravitasi (9,81 m/s²)
 H = Ketinggian Aliran Air yang melewati *V Notch Weir* (m)
 θ = Sudut *V Notch Weir*

- Luas Penampang ujung nosel (A)

$$A = \frac{1}{4} \pi \cdot d^2 \dots\dots\dots (2)$$

Dengan:
 A = Luasan ujung nosel (m²).
 d = diameter ujung nosel (m).

- Kecepatan Aliran (v)

$$v = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots (3)$$

Dengan:
 v = Kecepatan aliran (m/s).
 Q = Kapasitas aliran air (m³/s).
 A = Luasan ujung nosel (m²).

- Kecepatan anguler/tangensial (ω)

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \dots\dots\dots (4)$$

Dengan:
 ω = Kecepatan anguler/tangensial (rad/s).

- Gaya (F)

$$F = m \cdot g \dots\dots\dots (5)$$

- Torsi (T)

$$T = F \cdot r \dots\dots\dots (6)$$

Dengan:
 T = Torsi (N.m)
 F = Gaya (N)
 r = Lengan / jari-jari (m)

- Daya Turbin

$$Pt = T \cdot \omega \dots\dots\dots (7)$$

Dengan:
 Pt = Daya turbin (Watt)
 T = Torsi (N.m)
 ω = Kecepatan angular (rad/s)

- Daya air (Pa)
 Untuk menghitung daya air menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Pa = Pk + Pp \dots\dots\dots (2.7)$$

$$Ek = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V \dots\dots\dots (2.9)$$

$$Pk = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2 \dots\dots\dots (2.10)$$

$$Pk = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \dots\dots\dots (2.11)$$

$$Ph = \frac{F}{A} = \frac{\rho \cdot A \cdot g \cdot h}{A} = \rho \cdot g \cdot h \dots\dots\dots (2.12)$$

$$Pp = Q \times Ph \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan:
 Pa = Daya air (watt)
 Pp = Daya Potensial (watt).
 Pk = Daya kinetik (watt).
 A = Luas ujung nozzle (m²)
 v = Kecepatan aliran (m/s)
 Q = Kapasitas aliran turbin (m³/s)
 Ph = Tekanan Hidrostatik (N/m²)
 ṁ = Laju Aliran Massa (Kg/s)

- Efisiensi Turbin (η)

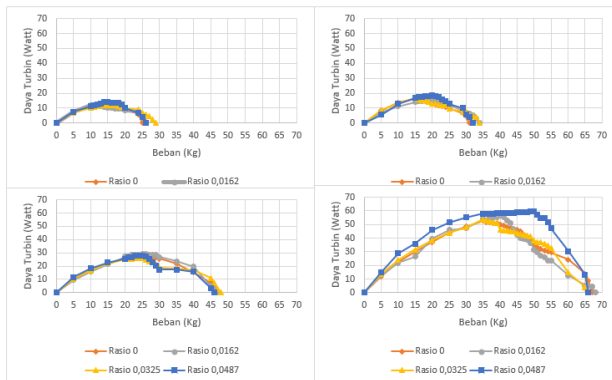
$$\eta = \frac{Pt}{Pa} \cdot 100\% \dots\dots\dots (11)$$

Dengan:
 η = Efisiensi turbin (%)
 Pt = Daya turbin (Watt)
 Pa = Daya air (Watt)

Pembahasan

Data yang diperoleh dari proses pengukuran selanjutnya dimanfaatkan untuk menghitung besaran daya dan efisiensi turbin yang dihasilkan. Hasil perhitungan tersebut kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik agar lebih mudah dipahami serta dianalisis. Selain itu, data yang telah diolah dikelompokkan berdasarkan kapasitas aliran air yang dihasilkan dari setiap variasi bukaan katup yang digunakan, sehingga perbandingan antar kondisi pengujian dapat dilakukan secara lebih sistematis dan terstruktur. Penyajian ini juga bertujuan untuk mempermudah identifikasi hubungan antara variabel yang diuji dengan kinerja turbin yang dihasilkan

A. Perbandingan Daya Turbin Pelton Variasi Rasio Ketinggian Sudu dengan Diameter Luar Turbin pada Sudu Tipe Segitiga V Terpancung Posisi Melintang



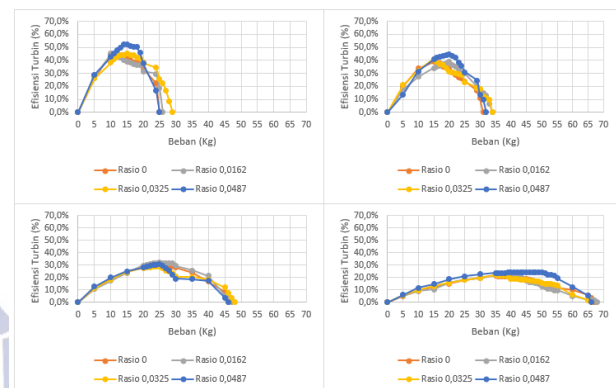
Gambar 5. Grafik Daya Turbin Pada Setiap Kapasitas Aliran Air

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi rasio antara tinggi sudu berbentuk segitiga V terpancung posisi melintang terhadap diameter luar turbin Pelton memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap daya yang dihasilkan, di mana pada debit $0,00229 \text{ m}^3/\text{s}$ diperoleh daya tertinggi sebesar 13,899 Watt pada rasio 0,0487 dengan beban 15 kg, pada debit $0,00260 \text{ m}^3/\text{s}$ nilai maksimum 18,482 Watt juga dicapai pada rasio yang sama dengan beban 20 kg, pada kondisi $0,00328 \text{ m}^3/\text{s}$ performa terbaik justru terjadi pada rasio 0,0162 dengan daya 29,298 Watt pada beban 25 kg, sedangkan pada debit terbesar $0,00449 \text{ m}^3/\text{s}$ daya maksimum kembali diperoleh pada rasio 0,0487 dengan nilai 59,756 Watt pada beban 50 kg; secara umum peningkatan debit aliran cenderung diikuti oleh peningkatan daya turbin yang menunjukkan bahwa semakin besar energi kinetik aliran maka semakin besar pula kemampuan konversi energi menjadi daya mekanik, sementara rasio 0 secara konsisten menghasilkan daya paling rendah pada seluruh variasi debit karena bentuk sudu tanpa modifikasi kurang mampu menangkap dan mengarahkan jet air secara efektif sehingga proses transfer energi menjadi tidak optimal.

Temuan ini memperlihatkan bahwa modifikasi geometri sudu melalui penambahan bentuk pancung mampu meningkatkan kualitas interaksi antara aliran dan permukaan sudu, di mana pada rasio 0,0487 bidang tangkap menjadi lebih luas sehingga jet air dari nozzle dapat mengenai sudu secara lebih merata, menghasilkan transfer momentum yang lebih besar serta mengurangi kehilangan energi akibat percikan dan turbulensi, sehingga perubahan bentuk sudu memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan performa turbin. Jika ditinjau dari konsep segitiga kecepatan, kinerja turbin dipengaruhi oleh hubungan antara kecepatan jet air (c_1), kecepatan keliling sudu (u_1), dan kecepatan relatif (v_1), di mana pada rasio 0,0487 tercapai keseimbangan yang lebih ideal antara c_1 dan u_1 sehingga aliran relatif dapat mentransfer energi secara lebih efektif, sedangkan pada rasio yang lebih kecil terjadi ketidaktertangkapan aliran yang menyebabkan rugi energi lebih besar, sehingga secara keseluruhan rasio 0,0487 memberikan kondisi konversi energi paling

optimal dan menghasilkan daya maksimum dibandingkan variasi lainnya.

B. Perbandingan Efisiensi Turbin Pelton Variasi Rasio Ketinggian Sudu Dengan Diameter Luar Turbin Pada Sudu Segitiga V Terpancung Posisi Melintang.



Gambar 6. Grafik Efisiensi Turbin Pada Setiap Kapasitas Aliran Air

Berdasarkan hasil pengujian, variasi rasio tinggi sudu berbentuk segitiga V terpancung posisi melintang terhadap diameter luar turbin Pelton menunjukkan pengaruh yang cukup signifikan terhadap efisiensi, di mana pada debit $0,00229 \text{ m}^3/\text{s}$ efisiensi tertinggi sebesar 52,46% diperoleh pada rasio 0,0487 dengan pembebanan 15 kg, pada debit $0,00260 \text{ m}^3/\text{s}$ kondisi optimum kembali dicapai oleh rasio yang sama dengan efisiensi 44,77% pada beban 20 kg, kemudian pada debit $0,00328 \text{ m}^3/\text{s}$ efisiensi tertinggi bergeser ke rasio 0,0162 dengan nilai 32,09% pada beban 25 kg, sedangkan pada debit terbesar $0,00449 \text{ m}^3/\text{s}$ efisiensi maksimum kembali diperoleh pada rasio 0,0487 dengan nilai 24,43% pada beban 50 kg; secara umum efisiensi tertinggi terjadi pada kondisi debit $0,00229 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan rasio 0,0487, sementara rasio 0 selalu menghasilkan efisiensi terendah pada seluruh variasi debit karena keterbatasan sudu dalam menangkap dan mengarahkan jet air sehingga proses konversi energi tidak berjalan optimal.

Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan rasio sudu yang tepat mampu meningkatkan efektivitas pemanfaatan energi aliran, di mana rasio 0,0487 memberikan bidang tangkap yang lebih luas sehingga jet dari nozzle dapat mengenai permukaan sudu secara lebih merata, menghasilkan transfer momentum yang lebih baik, serta mengurangi kehilangan energi akibat percikan dan aliran yang tidak terarah, meskipun peningkatan beban cenderung menurunkan efisiensi karena hambatan mekanis semakin besar dan kemampuan aliran dalam mempertahankan putaran turbin menurun. Dalam sistem turbin Pelton, efisiensi merupakan perbandingan antara daya keluaran dan daya hidrolik yang tersedia, sehingga pada rasio 0,0487 terjadi keseimbangan paling baik antara energi masuk dan energi keluar yang membuat proses konversi berlangsung lebih efektif, sedangkan pada rasio yang lebih kecil sebagian energi jet tidak dimanfaatkan secara optimal akibat interaksi aliran dan sudu yang kurang baik, dan pada rasio yang terlalu besar juga dapat terjadi penurunan efisiensi akibat rugi-rugi energi seperti percikan, aliran tidak terarah, serta penurunan momentum

jet. Ditinjau dari konsep segitiga kecepatan, efisiensi maksimum dicapai ketika hubungan antara kecepatan jet air (c_1) dan kecepatan sudu (u_1) menghasilkan kecepatan relatif (v_1) yang paling efektif dalam mentransfer energi ke sudu, di mana pada rasio 0,0487 tercapai kesesuaian yang lebih ideal antara c_1 dan u_1 sehingga aliran relatif dapat mengikuti permukaan sudu dengan lebih stabil dan menghasilkan gaya impuls yang lebih konsisten, sehingga secara keseluruhan rasio tersebut memberikan kondisi paling optimal dalam mekanisme konversi energi dibandingkan variasi lainnya

PENUTUP

Kesimpulan

1. Daya maksimum pada penelitian ini tercatat sebesar 59,756 Watt yang diperoleh pada turbin dengan rasio 0,0487, terjadi pada kapasitas aliran 0,00449 m³/s dengan pembebanan 50 kg. Hasil ini menunjukkan bahwa rasio tersebut memiliki kemampuan interaksi paling baik antara jet air dan sudu jika dibandingkan dengan variasi rasio 0, 0,0162, dan 0,0325. Pada kondisi rasio yang lebih kecil, luas bidang tangkap sudu terhadap aliran menjadi terbatas sehingga energi yang diterima tidak dapat dimanfaatkan secara maksimal. Sebaliknya, rasio 0,0487 menghasilkan kondisi yang lebih seimbang antara kecepatan absolut aliran (c_1), kecepatan keliling sudu (u_1), dan kecepatan relatif (v_1), sehingga gaya impuls dari jet air dapat bekerja lebih efektif pada runner. Di samping itu, bentuk sudu segitiga V terpancung posisi melintang turut berperan dalam menjaga kestabilan arah aliran serta menekan kehilangan energi akibat turbulensi, sehingga transfer momentum meningkat dan konversi energi menjadi daya mekanik berlangsung lebih optimal.
2. Nilai efisiensi tertinggi dalam penelitian ini juga diperoleh pada turbin dengan rasio 0,0487 yaitu sebesar 52,46% pada kapasitas aliran 0,00229 m³/s dengan pembebanan 15 kg. Hal ini mengindikasikan bahwa rasio tersebut mampu memberikan rasio paling efektif antara daya keluaran turbin dan daya hidrolik yang tersedia dibandingkan variasi lainnya (0, 0,0162, dan 0,0325). Secara konsep, efisiensi dicapai ketika energi masuk dapat diubah menjadi energi keluaran dengan rugi-rugi seminimal mungkin, sehingga performa optimal terjadi pada kondisi tersebut. Pada rasio 0,0487, hubungan antara kecepatan jet air (c_1), kecepatan sudu (u_1), dan kecepatan relatif (v_1) berada pada kondisi yang lebih ideal, sehingga proses pembelokan aliran oleh sudu berlangsung lebih efektif dan kehilangan energi akibat tumbukan maupun turbulensi dapat ditekan. Selain itu, geometri sudu segitiga V terpancung posisi melintang membantu meningkatkan kestabilan aliran serta mengurangi percikan, sehingga transfer momentum menjadi lebih baik dan efisiensi turbin meningkat secara keseluruhan.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian mengenai variasi rasio ketinggian sudu terhadap diameter luar turbin pada sudu

tipe segitiga V terpancung posisi melintang, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Diperlukan penelitian lanjutan yang membahas penambahan sekat pada sudu segitiga V terpancung posisi melintang untuk mengkaji sejauh mana pengaturan arah aliran air dapat memengaruhi peningkatan daya serta efisiensi turbin.
2. Pada penelitian berikutnya, disarankan penggunaan sistem pembebanan yang lebih mendekati kondisi nyata, seperti beban berupa lampu atau beban listrik, sehingga hasil pengujian kinerja turbin Pelton dapat lebih representatif terhadap aplikasi di lapangan.
3. Disarankan juga penerapan sistem pengukuran putaran (RPM) berbasis Arduino yang terintegrasi dengan laptop atau komputer, agar proses pengambilan data dapat dilakukan secara otomatis, lebih cepat, serta menghasilkan tingkat akurasi yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrian, M. M., Purnomo, E. P., Enrici, A., & Khairunnisa, T. (2023). Energy transition towards renewable energy in Indonesia. *Journal Heritage and Sustainable Development*, vol. 5(1), 107–118. <https://doi.org/10.37868/hsd.v5i1.108>
- Bono. (2013). Rekayasa Bentuk Sudu Turbin Pelton Untuk Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro. *Journal Prosiding SNST*, 7 Vol. (Prosiding SNST ke-4 Tahun 2013), 34. https://publikasiilmiah.unwahas.ac.id/PROSIDING_SNST_FT/article/view/752
- Liem, S. B. (2016). Analisis Pengaruh Tinggi Jatuhnya Air (Head) Terhadap Daya Pembangkit Listrik Tenaga Micro Hydro Tipe Turbin Pelton. *Jurnal Voering*, Vol. 2(1), 53. <https://doi.org/10.32531/jvoe.v2i1.64>
- Nuruddin, M., & Adiwibowo, P. H. (2022). STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH SUDU BERPENAMPANG V TERPANCUNG TERHADAP DAYA DAN EFISIENSI TURBIN CROSSFLOW POROS HORIZONTAL Muhammad Nuruddin Priyo Heru Adiwibowo. *Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya*, vol. 10, 129–140.
- Rodriguez, C. G., Zambrano, D., Reyes, S., Tapia, J., Egusquiza, M., & Egusquiza, E. (2020). Dynamic model for axial motion of horizontal Pelton turbine and validation in actual failure case. *Journal Shock and Vibration*, vol. 2020(1), 8811961.
- Taufiqurrahman, A., & Windarta, J. (2020). Overview Potensi dan Perkembangan Pemanfaatan Energi Air di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, vol 1(3), 124–132. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.10036>
- Valuby, A. H., Shalahuddin, Y., Yumono, F., & Rizal, R. F. (2022). Rancang Bangun PLTMH Menggunakan Turbin Pelton. *Jurnal Teknik Informatika Dan Elektro*, vol. 4(2), 100–111. <https://doi.org/10.55542/jurtie.v4i2.352>