

PENINGKATAN KINERJA TURBIN PELTON MELALUI VARIASI BERAT ROTOR PADA SISTEM ENERGI MIKROHIDRO

Dian Julianto Wahyudi^{1*)}, Johan Wayan Dika²

^{1*)}Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang, Indonesia

²Fakultas Ilmu Eksakta, Universitas Nahdlatul Ulama Blitar, Indonesia

^{*)}Corresponding author: dian.wahyudi.ft@um.ac.id

ABSTRACT

Pelton turbines are a type of energy generation that utilizes energy potential from differences in water flow height. This technology can act as an alternative energy source to meet power needs. To optimize its performance, one of the important aspects that needs to be analyzed is the dimensions and weight of the turbine runner. This study aims to evaluate the effect of rotor mass variation on the output power and efficiency of the Pelton turbine, to determine the most optimal weight configuration. The study method included the collection of experimental data from three rotor weight variations, namely 50%, 75%, and 100%, with two water discharge conditions regulated through full and half valve openings. Power and efficiency calculations are carried out based on the parameters of force, rotation speed, pressure, and water flow rate. The results showed that the variation in rotor weight significantly affected the power and efficiency of the turbine. A maximum power of 12,449-watts is achieved at 100% weight with a fully open valve, while a minimum power of 8,101-watts occurs at a 50% weight with a half-valve opening. The highest efficiency was recorded at 52% at 100% weight with a half-valve opening, while the lowest efficiency of 26.8% was obtained at a 50% weight with a fully open valve.

Keywords: Pelton Turbine, Rotor Efficiency, Micro Hydro System, Rotor Weight Variation, Output Power

ABSTRAK

Turbin Pelton merupakan salah satu jenis pembangkit energi yang memanfaatkan potensi energi dari perbedaan ketinggian aliran air. Teknologi ini dapat berperan sebagai alternatif sumber energi untuk memenuhi kebutuhan daya. Untuk mengoptimalkan performanya, salah satu aspek penting yang perlu dianalisis adalah dimensi dan bobot runner turbin. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi massa rotor terhadap daya keluaran dan efisiensi turbin Pelton, guna menentukan konfigurasi bobot yang paling optimal. Metode penelitian mencakup pengumpulan data eksperimental dari tiga variasi bobot rotor, yaitu 50%, 75%, dan 100%, dengan dua kondisi debit air (discharge) yang diatur melalui bukaan katup penuh dan setengah. Perhitungan daya dan efisiensi dilakukan berdasarkan parameter gaya, kecepatan rotasi, tekanan, serta laju aliran air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi bobot rotor secara signifikan mempengaruhi daya dan efisiensi turbin. Daya maksimum sebesar 12,449-watt dicapai pada bobot 100% dengan katup terbuka penuh, sementara daya minimum sebesar 8,101-watt terjadi pada bobot 50% dengan bukaan katup setengah. Efisiensi tertinggi tercatat sebesar 52% pada bobot 100% dengan bukaan katup setengah, sedangkan efisiensi terendah sebesar 26,8% diperoleh pada bobot 50% dengan katup terbuka penuh.

Kata Kunci: Turbin Pelton, Efisiensi Rotor, Sistem Mikrohidro, Variasi Berat Rotor, Daya Keluaran

PENDAHULUAN

Pada era modern ini, kebutuhan energi mengalami peningkatan yang signifikan seiring dengan tingginya ketergantungan masyarakat terhadap energi dalam menunjang berbagai aktivitas kehidupan, baik pada sektor domestik maupun industri. Energi telah menjadi komponen fundamental dalam pembangunan dan kesejahteraan sosial ekonomi[1]. Hampir seluruh aspek kehidupan manusia tidak terlepas dari konsumsi energi, yang secara konsisten menunjukkan tren kenaikan setiap tahunnya. Energi [2] telah bertransformasi menjadi kebutuhan esensial, dengan estimasi pertumbuhan permintaan energi mencapai sekitar 12% per tahun. Untuk merealisasikan target kontribusi energi baru dan terbarukan (EBT) sebesar 23% dalam bauran energi nasional pada tahun 2025, diperlukan peningkatan kapasitas pembangkit EBT sekitar 2.000 MW setiap tahunnya. Strategi percepatan transisi energi ini menjadi sangat krusial dalam rangka mewujudkan sistem energi yang berkelanjutan, ramah lingkungan, dan berdaya saing tinggi [3] [4] [5].

Pemanfaatan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) di Indonesia dinilai memiliki potensi strategis dalam menjawab tantangan pemenuhan kebutuhan energi nasional, terutama di tengah keterbatasan cadangan energi fosil seperti batu bara dan minyak bumi yang kian menipis. Ketergantungan yang tinggi terhadap sumber energi fosil tidak hanya berdampak terhadap keberlanjutan pasokan energi, namun juga menimbulkan ancaman serius terhadap ketahanan energi nasional [6] [7]. Saat ini, kontribusi EBT dalam bauran energi Indonesia masih tergolong sangat rendah, yakni sekitar 1,6%, sementara dominasi energi fosil masih mendominasi dengan porsi bahan bakar minyak (BBM) mencapai 54,4% dari total konsumsi energi nasional[2]. Ketidakseimbangan bauran energi ini menjadi salah satu dari lima faktor utama yang menyebabkan kerentanan dalam sistem ketahanan energi suatu negara [8]. Untuk itu, transformasi menuju sistem energi berkelanjutan melalui peningkatan porsi EBT merupakan langkah strategis guna memperkuat ketahanan energi dan mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya yang tidak terbarukan [1] [9]. Di Indonesia, terutama pada wilayah terpencil, akses terhadap jaringan listrik nasional masih sangat terbatas. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya permintaan energi listrik di kawasan perkotaan yang tidak diimbangi dengan pembangunan infrastruktur pembangkit listrik baru di wilayah rural. Ketimpangan ini mendorong pentingnya solusi alternatif berbasis potensi lokal, salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) yang memanfaatkan potensi aliran air dari ketinggian untuk menghasilkan energi Listrik [10]. Salah satu komponen utama dalam PLTMH adalah turbin Pelton, yakni jenis turbin impuls yang dirancang khusus untuk lokasi dengan tinggi jatuh (head) yang tinggi dan debit air yang relatif kecil [11]. Turbin ini bekerja dengan mengubah energi potensial air menjadi energi kinetik, kemudian menjadi energi mekanik untuk menggerakkan generator listrik [12]. Efisiensi dan kesederhanaan konstruksinya menjadikan turbin Pelton sangat sesuai diterapkan di wilayah pedesaan yang memiliki karakteristik topografi berbukit atau pegunungan. Implementasi PLTMH menggunakan turbin Pelton telah terbukti efektif dalam mendukung elektrifikasi desa, memperkuat ketahanan energi lokal, serta mendorong pembangunan berkelanjutan di wilayah tertinggal[13].

Desain dan perhitungan dimensi turbin Pelton memainkan peran penting dalam menentukan kinerja operasionalnya. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengoptimalkan daya dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin ini. Turbin Pelton memiliki konstruksi kompleks

yang meliputi komponen seperti runner, nozzle, dan poros turbin. Salah satu aspek penting yang dapat dianalisis untuk meningkatkan kinerja adalah berat dari runner turbin. Penelitian menunjukkan bahwa variasi berat runner dapat mempengaruhi efisiensi dan output daya turbin. Misalnya, studi oleh Patel [14] menunjukkan bahwa desain runner dengan struktur hooped dapat meningkatkan efisiensi turbin secara keseluruhan. Selain itu, analisis oleh Vessaz [15] menekankan pentingnya optimasi desain runner untuk mencapai kinerja optimal. Studi lain oleh Nasir [16] membahas pengaruh variasi berat runner terhadap kecepatan dan torsi turbin. Penelitian oleh [17] juga mengeksplorasi penggunaan material alternatif untuk runner, seperti bambu, dan dampaknya terhadap kinerja turbin. Terakhir, penelitian oleh Patel [14] membandingkan kinerja runner tradisional dengan desain baru, menunjukkan peningkatan efisiensi pada desain yang dioptimalkan. Temuan-temuan ini menekankan pentingnya mempertimbangkan berat dan desain runner dalam upaya meningkatkan efisiensi dan output daya turbin Pelton.

Pemilihan turbin Pelton sebagai objek penelitian didasarkan pada karakteristiknya yang cocok untuk sistem mikrohidro di wilayah perbukitan, yang memiliki head tinggi dan debit air terbatas. Selain turbin Pelton, jenis turbin lain yang umum digunakan dalam PLTMH antara lain turbin Crossflow, Francis, dan Kaplan, yang masing-masing disesuaikan dengan kondisi head dan debit tertentu. Namun, karena fokus penelitian ini adalah pada simulasi sistem mikrohidro dengan head tinggi dan debit kecil, turbin Pelton merupakan pilihan paling relevan. Selain itu, desainnya yang sederhana dan modular memungkinkan penyesuaian rotor dengan lebih mudah untuk kebutuhan eksperimen. Namun, belum banyak studi yang secara sistematis menganalisis pengaruh variasi berat rotor terhadap performa turbin Pelton dalam sistem mikrohidro. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk mengevaluasi bagaimana perubahan berat rotor memengaruhi daya dan efisiensi turbin dalam dua kondisi bukaan katup.

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi berat rotor terhadap daya dan efisiensi turbin Pelton dalam sistem energi mikrohidro. Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi konfigurasi berat rotor yang optimal untuk meningkatkan performa turbin.

1. Daya Turbin Pelton

Daya yang dihasilkan oleh turbin pelton dapat dihitung menggunakan persamaan

$$P_t = T \cdot \omega$$

Dimana: P_t = daya (watt)
 T = torsi (Nm)
 ω = kecepatan sudut (rad/s)
 $\omega = (2 \cdot \pi \cdot n) / 60$
 Dimana: ω = kecepatan sudut (rad/s)
 n = kecepatan rotor (rpm)

2. Efisiensi Turbin Pelton

Efisiensi didapatkan dari daya yang dihasilkan dibagi dengan daya keluaran yang dilakukan turbin pelton, daya yang dihasilkan dihitung menggunakan persamaan di atas sedangkan untuk daya yang digunakan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Dixon:1998):

$$P_i = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$$

dimana:

P_i = Daya aliran air pada suatu penampang

ρ = massa jenis air (1000 kg/m^3)

g = gaya gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

H = head efektif (m)

Q = Kapasitas air (m^3/s)

Sehingga efisiensi pada turbin ini dapat menggunakan persamaan sebagai berikut (Dietzel:1996):

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_i} \times 100\%$$

dimana:

η_t = efisiensi turbin(turbin)

P_t = Daya yang dihasilkan oleh turbin

P_i = Daya aliran air pada suatu penampang

METODE

Penelitian ini menggunakan desain penelitian *pre – experimental* metode *one – shot case study*, bentuk penelitian eksperimental yang paling sederhana pada penelitian ini dapat berupa pendekatan eksperimental yang berusaha untuk menjelaskan, mengendalikan dan menggambarkan suatu fenomena setelah mungkin dengan dibuktikan adanya data yang mendukung validnya suatu eksperimen. Variabel bebas adalah variasi berat rotor (50%, 75%, 100%), sedangkan variabel terikat adalah daya keluaran dan efisiensi. Data diambil pada dua kondisi debit, yaitu bukaan katup penuh dan setengah.

1. Rancangan Penelitian

Rancangan yang digunakan pada penelitian ini yaitu dengan 3 variasi berat rotor dan presentase setiap beratnya sudah ditentukan dan digambarkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 1. Rancangan Penelitian

Besar Bukaan Katup	Penuh		Setengah	
	Daya	Efisiensi	Daya	Efisiensi
Berat Rotor Turbin				
Berat 100%	P1	η_1	P4	η_4
Berat 75%	P2	η_2	P5	η_5
Berat 50%	P3	η_3	P6	η_6

Sumber: Hasil Penelitian

2. Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah lembar observasi yang berisi data numerik mengenai putaran, torsi, tekanan, dan debit aliran yang dihasilkan oleh rotor turbin Pelton setelah dilakukan penambahan berat. Untuk mendukung proses pengambilan data dan analisis, digunakan berbagai peralatan, yaitu turbin Pelton skala laboratorium sebagai objek utama pengujian, neraca (timbangan) untuk mengukur massa tambahan pada rotor, serta alat-alat bantu seperti obeng, palu, penitik, mistar, kalkulator, amplas, dan ragum untuk keperluan perakitan serta penyesuaian mekanik. Selain itu, digunakan pula instrumen pengukuran presisi seperti dinamometer untuk mengukur torsi, tachometer untuk mengukur kecepatan putaran, flow meter digital untuk mengetahui debit aliran air, serta pressure transducer transmitter untuk mencatat tekanan fluida secara akurat. Semua alat tersebut berfungsi menunjang kelengkapan data yang dibutuhkan dalam penelitian ini.

3. Objek Penelitian

Dalam penelitian ini, objek yang digunakan adalah rotor turbin, yang memiliki diameter piringan sebesar 145 mm dan dilengkapi dengan sembilan buah sudu saat beroperasi. Variabel penelitian dikaji melalui penambahan massa pada rotor turbin yang bobot awalnya telah diketahui. Bobot awal dianggap sebagai 50% dari total berat, kemudian ditambahkan variasi berat hingga mencapai 75% dan 100% berdasarkan bobot awal tersebut. Penambahan massa dilakukan dengan memasang piringan tambahan di sisi kanan dan kiri rotor, yang dikaitkan menggunakan mur dan baut agar dapat dengan mudah dipasang maupun dilepas sesuai kebutuhan variasi berat. Penghitungan daya dan efisiensi dilakukan menggunakan rumus yang relevan dengan memasukkan data hasil pengukuran yang diperoleh selama proses pengumpulan data eksperimen. Rotor awal berbobot 1182-gram dijadikan basis 50%. Variasi berat 75% dan 100% dicapai dengan menambahkan piringan logam dari baja karbon, dipasang simetris menggunakan mur dan baut. Setiap variasi diuji pada kondisi debit tetap.



Gambar 1. Turbin Pelton Skala Mikro

4. Alur Penelitian



Alur penelitian ini dimulai dengan pembuatan rotor turbin Pelton, yang kemudian dilanjutkan dengan pengukuran berat awal rotor. Berat awal ini dijadikan sebagai variasi 50% dalam pengujian dan menjadi dasar perbandingan untuk variasi berat berikutnya, yaitu 75% dan 100%. Sebelum turbin dioperasikan, dilakukan pra-pengoperasian dengan membuka katup pengatur (*gate valve*) terlebih dahulu untuk menjaga umur pemakaian pompa pengumpan serta memastikan air di bak penampung dalam kondisi penuh. Selanjutnya, turbin dioperasikan dengan menyalakan sumber daya dan mengalirkan air melalui katup yang dibuka secara penuh maupun setengah terbuka, di mana sudut bukaan diukur menggunakan penggaris busur. Pengambilan data dilakukan selama pengoperasian, meliputi pengukuran gaya sebesar 10 N melalui penarikan sabuk pada poros, pengukuran putaran dengan tachometer, tekanan air dengan *pressure transducer transmitter* untuk konversi menjadi nilai ketinggian, serta debit air menggunakan *flow meter digital*. Pengukuran dilakukan berulang sebanyak lima kali untuk memastikan akurasi hasil. Setelah semua data diperoleh dan dikonversi sesuai satuan yang diinginkan, dilakukan perhitungan rata-rata untuk menentukan daya dan efisiensi turbin menggunakan rumus yang sesuai. Prosedur pengujian kemudian diulang dari tahap pengukuran berat rotor dengan variasi 75% dan 100%, dan setelah seluruh variasi selesai diuji, data yang telah dikumpulkan dianalisis lebih lanjut untuk mendapatkan kesimpulan yang akurat dari penelitian ini.

5. Teknik Pengolahan Data

Metode analisis data yang diterapkan dalam penelitian ini adalah analisis deskriptif, yang bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh variasi berat rotor terhadap daya dan efisiensi turbin Pelton. Data hasil pengujian yang telah dikumpulkan kemudian diolah untuk memperoleh nilai rata-rata dari setiap parameter yang diamati. Untuk mempermudah interpretasi hasil, data tersebut disajikan dalam bentuk grafik menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel.

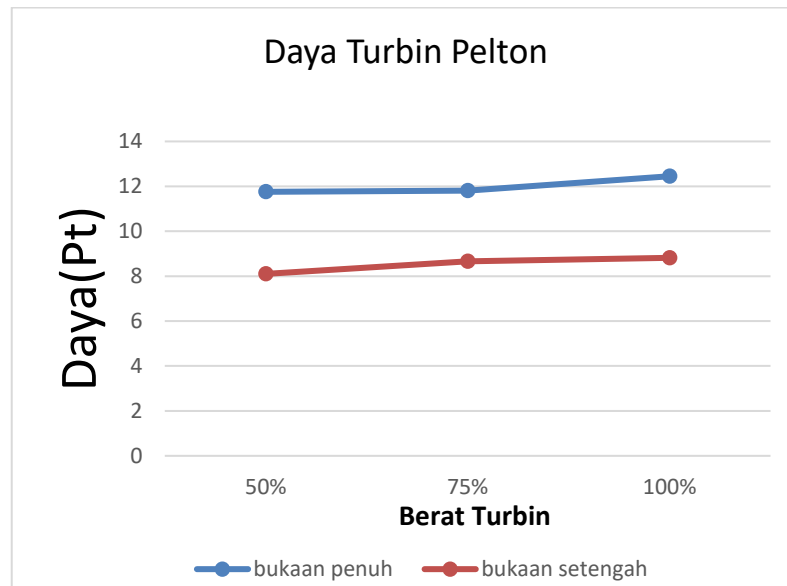
HASIL DAN PEMBAHASAN

Daya yang dihasilkan setelah dilakukan pengujian dan dianalisis menggunakan persamaan yang ada di atas, didapat hasil sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil Perhitungan Daya

Variable		torsi (Nm)	kec. Sudut (rad/s)	Pt (watt)
Penuh	50%	0.15	78.3744	11.75616
	75%	0.15	78.7512	11.81268
	100%	0.15	82.99648	12.449472
Setengah	50%	0.15	54.008	8.1012
	75%	0.15	57.776	8.6664
	100%	0.15	58.7808	8.81712

Sumber: Hasil Penelitian



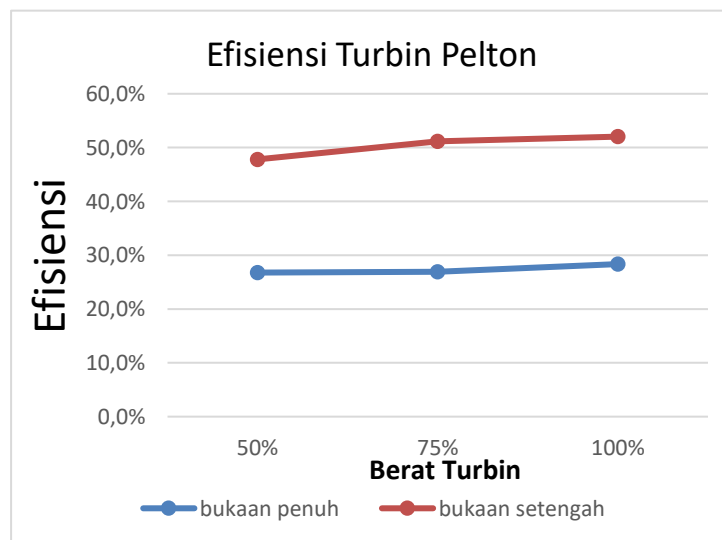
Gambar 2. Grafik Hasil Daya Akibat Pengaruh Berat Turbin Pelton

Hasil efisiensi yang telah dihitung juga telah dianalisis dan sebelumnya telah dihitung daya yang digunakan dan digunakan untuk menghitung efisiensi turbin pelton sehingga diperoleh data seperti di bawah ini:

Tabel 3. Hasil Perhitungan Daya Yang Digunakan

Variable		Debit m ³ /s	grafitasi m/s	Head (m)	massa jenis air kg/m ³	Pi(watt)
Penuh	50%	0.000383	9.8	11.7	1000	43.914
	75%					43.914
	100%					43.914
setengah	50%	0.000133	13	13	1000	16.9442
	75%					16.9442
	100%					16.9442

Sumber: Hasil Penelitian



Gambar 3. Efisiensi Turbin Pelton

Tabel 4. Hasil Perhitungan Efisiensi Turbin Pelton

Variable		Daya (Pt)	Daya (Pi)	Efisiensi (%)
Penuh	50%	11.75616	43.914	26.77087034
	75%	11.81268	43.914	26.89957644
	100%	12.449472	43.914	28.34966525
Setengah	50%	8.1012	16.9442	47.81105039
	75%	8.6664	16.9442	51.14670507
	100%	8.81712	16.9442	52.03621298

Sumber: Hasil Penelitian

Berdasarkan data hasil pengujian, berikut ini pembahasan analisis data. Pembahasan dibagi menjadi 2 yaitu, proses pembuatan variasi berat *runner* serta daya dan efisiensi yang dihasilkan turbin pelton.

1. Berat Rotor

Berat rotor merupakan salah satu parameter penting dalam kinerja turbin Pelton, yang dipengaruhi oleh jenis material serta dimensi runner, termasuk ketebalan dan diameter. Di antara berbagai parameter yang sering diteliti, ukuran runner menjadi salah satu fokus utama karena secara signifikan memengaruhi performa turbin. Dalam penelitian ini, dilakukan tiga variasi berat rotor yaitu 50%, 75%, dan 100%. Berat awal rotor yang digunakan sebagai objek penelitian adalah 1182-gram dan dijadikan sebagai dasar untuk variasi 50%. Selanjutnya, variasi 75% dan 100% dihitung berdasarkan berat awal tersebut, sehingga kedua variasi tersebut memiliki bobot yang lebih besar dibandingkan rotor pada kondisi awal.


Gambar 4. Berat Awal Rotor

Ukuran berat yang dimiliki oleh variasi 75% sebesar 1773 gram. Ukuran ini didapatkan dengan variasi 75% diibagi 50% dikali berat awal, adapun menghitung beratnya dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{75\%}{50\%} \times 1182 \text{ gram} = 1773 \text{ gram}.$$

Ukuran berat yang selanjutnya untuk variasi berat 100% yaitu sebesar 2364-gram dua kali lipat lebih besar dari berat awal.

$$\frac{100\%}{50\%} \times 1182 \text{ gram} = 2364 \text{ gram}.$$

Berat yang didapatkan oleh setiap variasi menggunakan bahan tambah dari besi baja yang telah dibentuk menjadi piringan turbin, setiap variasi berat diberikan 2 piringan yang ukurannya sama besar ukurannya sehingga kondisi stabil tetap didapatkan saat proses pengujian, begitupun pada variasi berat 100% pula. Bahan tambah yang digunakan pada setiap variasi diperlihatkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 5. Piringan Variasi 75%



Gambar 6. Piringan Variasi 100%

1. Daya

Daya yang dihasilkan oleh turbin pelton pada penelitian ini terbagi menjadi 2 bagian sebagai berikut:

a. Bukaan Penuh

Katup pada turbin Pelton berfungsi sebagai jalur keluarnya aliran air sebelum mengenai runner untuk menghasilkan putaran. Salah satu parameter penting yang dipengaruhi oleh tingkat bukaan katup adalah debit air yang digunakan oleh turbin. Pada kondisi bukaan penuh, debit air yang dihasilkan secara keseluruhan tercatat sebesar $0,000383 \text{ m}^3/\text{s}$, dan nilai ini konsisten untuk setiap variasi berat rotor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa daya maksimum yang dihasilkan

pada bukaan penuh adalah 12,449-watt saat rotor memiliki berat 100%, sedangkan daya terendah sebesar 11,756 watt diperoleh pada variasi berat 50%. Berdasarkan grafik daya (Gambar 3), terdapat kenaikan daya antar variasi berat, meskipun tidak signifikan. Kenaikan daya dari berat 50% ke 75% hanya sebesar 0,056 watt, sedangkan dari 75% ke 100% meningkat sebesar 0,637 watt. Temuan ini mengindikasikan bahwa berat 75% dapat dijadikan sebagai batas minimum efektif pada kondisi bukaan penuh, dan terdapat potensi peningkatan daya lebih lanjut seiring bertambahnya berat rotor. Jika dilakukan penambahan berat lebih besar dari 100%, dapat diperoleh estimasi daya puncak berdasarkan tren yang terlihat pada grafik.

b. Bukaan Setengah

Pada kondisi bukaan setengah, debit air yang dihasilkan juga tercatat konstan untuk seluruh variasi berat, yaitu sebesar 0,000133 m³/s (lihat Tabel 3). Daya maksimum pada kondisi ini mencapai 8,817-watt pada variasi berat rotor 100%, sementara daya minimum sebesar 8,101-watt terjadi pada berat 50%. Grafik daya (Gambar 2) menunjukkan bahwa peningkatan daya antar variasi berat juga terjadi, namun dengan pola yang berbeda dari bukaan penuh. Kenaikan daya dari 50% ke 75% sebesar 0,565-watt tergolong cukup signifikan, sedangkan dari 75% ke 100% hanya naik sebesar 0,151 watt. Hal ini menunjukkan bahwa pada bukaan setengah, variasi berat 100% dapat dianggap sebagai titik optimal, karena peningkatan daya setelah titik tersebut menjadi sangat kecil. Jika dilakukan pengujian dengan berat yang melebihi 100%, ada kemungkinan daya yang dihasilkan justru menjadi stagnan atau mengalami penurunan. Peningkatan berat rotor menunjukkan tren peningkatan daya dan efisiensi. Hal ini disebabkan meningkatnya momen inersia, yang memperlambat percepatan awal namun mempertahankan rotasi lebih stabil. Grafik daya dan efisiensi memperlihatkan tren linier yang signifikan.

2. Efisiensi

Efisiensi yang dihasilkan pada penelitian ini terdapat dua macam yaitu bukaan katup penuh dan setengah sebagai berikut:

a. Bukaan Penuh

Debit air yang digunakan untuk menghitung efisiensi pada kondisi katup terbuka penuh sama dengan debit saat pengukuran daya sebelumnya, yaitu sebesar 0,000383 m³/s. Efisiensi maksimum yang tercatat pada kondisi ini adalah 28,3%, diperoleh pada variasi berat rotor 100%, sedangkan efisiensi terendah sebesar 26,8% terjadi pada variasi berat 50%.

Grafik efisiensi (Gambar 3) tidak hanya menunjukkan nilai tertinggi dan terendah, tetapi juga menggambarkan tren perubahan efisiensi antar variasi berat rotor. Pola perubahan ini serupa dengan tren pada daya yang telah dibahas sebelumnya. Peningkatan efisiensi yang paling signifikan terjadi antara variasi berat 75% ke 100%, yaitu sebesar 1,4%, sedangkan peningkatan dari 50% ke 75% hanya sebesar 0,1%. Temuan ini mengindikasikan bahwa titik optimal efisiensi belum sepenuhnya tercapai, sehingga masih memungkinkan untuk mengembangkan variasi berat lebih dari 100% guna menemukan nilai efisiensi puncak. Baik daya maupun efisiensi menunjukkan pola peningkatan yang sejalan terhadap penambahan berat rotor pada kondisi katup terbuka penuh, sebagaimana tergambar dalam kedua grafik yang disajikan.

b. Bukaannya Setengah

Debit air yang diperoleh dari bukaan katup setengah sebesar $0,000133 \text{ m}^3/\text{s}$ digunakan secara konstan dalam pengujian ini, sama seperti saat perhitungan daya pada kondisi katup tersebut. Efisiensi tertinggi tercatat pada variasi berat rotor 100% sebesar 52%, sedangkan efisiensi terendah dicapai pada variasi berat 50% dengan nilai 47,8%.

Grafik efisiensi (Gambar 3) menunjukkan adanya peningkatan efisiensi yang tidak terlalu signifikan antara variasi berat tertentu. Dari berat 50% ke 75% terjadi kenaikan efisiensi sebesar 3,7%, sedangkan dari 75% ke 100% peningkatannya hanya sebesar 0,9%. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi berat 100% dapat dianggap sebagai titik efisiensi maksimum untuk bukaan katup setengah, karena peningkatan yang diperoleh setelahnya relatif kecil. Apabila dilakukan penambahan berat di atas 100%, besar kemungkinan efisiensinya justru akan stabil atau bahkan menurun. Tren daya dan efisiensi yang dihasilkan dari bukaan katup setengah menunjukkan pola peningkatan yang sejalan dengan variasi berat rotor.

Perbandingan antara kedua jenis bukaan katup menunjukkan bahwa daya maksimum lebih tinggi dihasilkan oleh bukaan penuh, sementara efisiensi justru lebih tinggi pada bukaan setengah. Debit yang dihasilkan bukaan penuh juga lebih besar daripada bukaan setengah, namun peningkatan efisiensi pada bukaan setengah dapat dijelaskan melalui peningkatan tekanan di dalam bejana tekan. Pada bukaan penuh, tekanan yang tercatat adalah 1,1 atm, sedangkan pada bukaan setengah mencapai 1,3 atm (lihat Tabel 2). Tekanan yang lebih tinggi ini menyebabkan laju aliran air yang keluar dari katup menjadi lebih besar, meskipun debit totalnya lebih kecil, karena diameter bukaan katup yang lebih sempit mempercepat aliran (prinsip kontinuitas). Efek ini diperkuat oleh peningkatan tekanan dalam bejana, yang menghasilkan benturan aliran air yang lebih kuat terhadap runner, sehingga menghasilkan putaran rotor yang lebih cepat.

Dengan demikian, meskipun daya pada bukaan setengah sedikit lebih rendah dibandingkan bukaan penuh, efisiensinya justru lebih tinggi karena proporsi energi yang digunakan lebih optimal. Tren umum dari hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar berat rotor, semakin tinggi daya dan efisiensi yang diperoleh. Hal ini disebabkan oleh momen inersia dari rotor yang lebih berat, yang memberikan dorongan rotasi tambahan saat turbin bekerja. Efisiensi maksimum pada bukaan setengah menunjukkan bahwa debit kecil dengan tekanan lebih tinggi (1,3 atm vs 1,1 atm) menghasilkan jet air lebih fokus dan minim kehilangan energi. Ini sesuai prinsip Bernoulli dan kontinuitas fluida.

3. Analisis Teoretis

Pada bukaan penuh, tren peningkatan daya stagnan antara 50% dan 75% namun meningkat signifikan pada 100%, menunjukkan bahwa momen inersia baru berdampak optimal ketika mencapai ambang tertentu. Berat rotor yang bertambah meningkatkan kemampuan menyimpan energi kinetik rotasi, yang kemudian berkontribusi terhadap kestabilan putaran saat menerima impuls air. Secara teoritis, hal ini mendukung efisiensi konversi energi karena mengurangi fluktuasi torsi akibat variasi aliran. Meski demikian, jika berat terlalu besar, dapat menyebabkan inersia berlebihan yang memperlambat akselerasi sistem dan memerlukan waktu start-up yang lebih lama.

4. Risiko dan Keterbatasan

Penambahan berat memperbesar beban pada poros dan bantalan turbin. Dalam jangka panjang, hal ini dapat meningkatkan risiko deformasi permanen, keausan mekanis, serta ketidakseimbangan rotasi. Penelitian ini belum mencakup pengukuran vibrasi rotor, pengaruh keausan, atau kelelahan material akibat pembebanan berulang. Selain itu, pengujian dilakukan dalam skala laboratorium dan kondisi sistem terbuka tanpa pengendalian suhu atau kelembapan, yang bisa memengaruhi hasil pada skala nyata.

5. Perbandingan Studi

Dibandingkan dengan Patel [14], yang mengkaji desain runner hooped dengan efisiensi hingga 85% pada sistem tertutup, efisiensi dalam studi ini masih relatif rendah karena keterbatasan desain terbuka dan skala uji laboratorium. Studi oleh Vessaz [15] menekankan pentingnya distribusi massa dan simetri rotor dalam menjaga kestabilan dinamika aliran air ke sudu. Hasil penelitian ini juga mendukung temuan tersebut, di mana rotor 100% menunjukkan pola kestabilan output yang lebih tinggi. Sementara Nasir [16] mencatat bahwa material rotor turut memengaruhi efisiensi termal dan kekuatan struktur, yang dalam studi ini dibatasi hanya pada baja karbon sebagai bahan tambahan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian terhadap rotor turbin Pelton dengan variasi berat rotor yang bertujuan untuk mengevaluasi kinerja turbin, khususnya dalam hal daya dan efisiensi pada skala mikro, diperoleh sejumlah temuan penting. Daya tertinggi pada kondisi bukaan katup penuh tercapai pada variasi berat rotor 100% dengan nilai sebesar 12,449 watt, sedangkan daya terendah dicatat pada variasi berat 50% sebesar 11,756 watt. Potensi peningkatan daya pada kondisi ini masih dapat dieksplorasi melalui pengembangan lebih lanjut. Pada bukaan katup setengah, daya maksimum juga terjadi pada variasi berat 100% dengan nilai 8,817 watt, sementara daya terendah tercatat sebesar 8,101-watt pada berat 50%, dengan titik puncak daya terjadi pada variasi berat 75%. Dari sisi efisiensi, bukaan penuh menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 28,3% pada berat 100% dan terendah 26,8% pada berat 50%. Sementara itu, efisiensi maksimum pada bukaan setengah tercapai pada variasi berat 100% sebesar 52%, dan terendah pada berat 50% dengan nilai 47,8%. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan berat rotor berbanding lurus dengan peningkatan daya dan efisiensi turbin Pelton, di mana rotor yang lebih berat menghasilkan performa yang lebih baik dalam hal output daya dan efisiensi energi. Meskipun demikian, efisiensi keseluruhan masih rendah dibandingkan standar turbin Pelton (>80%) karena keterbatasan desain laboratorium dan faktor kehilangan energi.

Batasan: Studi ini terbatas pada 3 variasi berat tanpa analisis getaran atau durabilitas rotor. Pengujian dilakukan dalam sistem terbuka tanpa kendali tekanan otomatis.

Rekomendasi: Penelitian lanjutan perlu mengevaluasi efek penambahan berat di atas 100%, pengaruh getaran dinamis, serta penggunaan material alternatif dan kontrol tekanan dalam sistem tertutup.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] P. Sadorsky, "The effect of urbanization on CO₂ emissions in emerging economies," *Energy Econ*, vol. 41, pp. 147–153, 2014, doi: 10.1016/j.eneco.2013.11.007.
- [2] I. ENERGY and AGENCY, "World Energy Outlook 2021," 2021. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>

- [3] N. Apergis and J. E. Payne, "Renewable energy consumption and economic growth: Evidence from a panel of OECD countries," *Energy Policy*, vol. 38, no. 1, pp. 656–660, 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2009.09.002.
- [4] P. A. Owusu and S. Asumadu-Sarkodie, "A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation," *Cogent Eng*, vol. 3, no. 1, 2016, doi: 10.1080/23311916.2016.1167990.
- [5] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, "Role of renewable energy sources in environmental protection : A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1513–1524, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.037.
- [6] M. Asif and T. Muneer, "Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 7, pp. 1388–1413, 2007, doi: 10.1016/j.rser.2005.12.004.
- [7] H. Lund, "Renewable energy strategies for sustainable development," *Energy*, vol. 32, no. 6, pp. 912–919, 2007, doi: 10.1016/j.energy.2006.10.017.
- [8] A. Cherp and J. Jewell, "The concept of energy security: Beyond the four as," *Energy Policy*, vol. 75, pp. 415–421, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.09.005.
- [9] J. P. Painuly, "Barriers to renewable energy penetration: A framework for analysis," *Renew Energy*, vol. 24, no. 1, pp. 73–89, 2001, doi: 10.1016/S0960-1481(00)00186-5.
- [10] M. Rumbayan and R. Rumbayan, "Feasibility Study of a Micro Hydro Power Plant for Rural Electrification in Lalumpe Village, North Sulawesi, Indonesia," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 19, 2023, doi: 10.3390/su151914285.
- [11] L. K. Gudukeya and C. Mbohwa, "Improving the efficiencies of pelton wheel in Micro-Hydro Power plants," *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, vol. 2017, no. OCT, pp. 1089–1100, 2017.
- [12] S. Renewable and E. Solution, "Optimizing the Development of a PLTMH System Using Pelton Turbine Technology to Enhance Energy Efficiency in Remote Areas as an Affordable and Sustainable Renewable Energy Solution," vol. 2, no. 1, pp. 12–18, 2025.
- [13] F. Martins, C. Felgueiras, and M. Smitková, "Fossil fuel energy consumption in European countries," *Energy Procedia*, vol. 153, pp. 107–111, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.10.050.
- [14] S. D. & G. C. Vimal K. Patel, Hemal N. Lakdawala, "Performance Assessment of Pelton Turbine with Traditional and Novel Hooped Runner by Experimental Investigation," 2020, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-5955-6_125.
- [15] F. A. & C. T. Christian Vessaz, Loïc Andolfatto, "Toward design optimization of a Pelton turbine runner," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1465-7>.
- [16] B. A. Nasir, "Modelling, Fabrication & Analysis of Pelton Turbine for Different Head and Materials," *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. 2, pp. 1–7, 2018.
- [17] Muhibbuddin *et al.*, "Analysis the Performance for Runner Pelton Turbine by Using Bamboo Material," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 79, no. 2, pp. 139–148, 2021, doi: 10.37934/arfmts.79.2.139148.