

RANCANG BANGUN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO BERBASIS TURBIN PELTON PADA POND PENAMPUNGAN AIR DI BANDAR UDARA

Samuel Reinhard Batubara¹, Sukarwoto^{2*}, Syachru Ramadhany S³

^{1,2,3}Politeknik Penerbangan Makassar, Makassar, Indonesia

Keywords:

Microhydro Power Plant;
Pelton Turbine; water
retention pond; renewable
energy; green airport.

Correspondent Email:

sukarwoto@poltekbangmakassar.ac.id

Abstrak. Peningkatan kebutuhan energi di kawasan bandar udara mendorong pemanfaatan sumber energi terbarukan yang tersedia di lingkungan sekitar. Salah satu sumber yang berpotensi dimanfaatkan adalah aliran air pada pond penampungan melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun prototipe PLTMH berbasis Turbin Pelton serta menganalisis kinerjanya pada kondisi debit dan tinggi jatuh air (head) yang tersedia. Penelitian menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan pendekatan Engineering Design Process (EDP) dan pengujian eksperimental. Sistem menggunakan turbin Pelton 12 bucket, generator Permanent Magnet Generator (PMG) 12 V 150 W, sistem transmisi pulley dan belt, serta beban lampu LED 5 W. Pengujian dilakukan pada debit 0,0056 m³/s dan head 0,25 m dengan parameter putaran turbin, tegangan, arus, daya listrik, dan efisiensi. Hasil menunjukkan putaran turbin berada pada rentang 300–350 rpm, tegangan 12,41–12,73 V, arus 0,48–0,50 A, dan daya 5,96–6,37 W. Kinerja optimum diperoleh pada 335 rpm dengan daya 6,37 W dan efisiensi 46,39%. Hasil ini menunjukkan bahwa aliran air pada pond penampungan berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik skala kecil untuk mendukung penerapan green airport.



Copyright © 2026 The Author(s),
Published by Jurnal Informatika
dan Teknik Elektro Terapan. This
is an open-access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution-
NonCommercial 4.0 International
License (CC BY-NC 4.0).

Abstract. The increasing energy demand in airport areas encourages the utilization of renewable energy sources available within the surrounding environment. One potential source is water flow in a water retention pond, which can be utilized through a Microhydro Power Plant (MHP) system. This study aimed to design and develop a Pelton turbine-based MHP prototype and analyze its performance under the available flow rate and hydraulic head conditions. The study employed a Research and Development (R&D) method with an Engineering Design Process (EDP) approach and experimental testing. The system consisted of a 12-bucket Pelton turbine, a 12 V 150 W Permanent Magnet Generator (PMG), a pulley-belt transmission system, and a 5 W LED lamp as the load. Testing was conducted at a flow rate of 0.0056 m³/s and a head of 0.25 m, with turbine speed, voltage, current, electrical power, and efficiency as the observed parameters. The results showed a turbine speed range of 300–350 rpm, voltage of 12.41–12.73 V, current of 0.48–0.50 A, and electrical power of 5.96–6.37 W. The optimum performance was obtained at 335 rpm, producing 6.37 W of electrical power and an efficiency of 46.39%. These results indicate that water flow in a retention pond has potential as a small-scale electricity source to support the implementation of green airport.

1. PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas operasional bandar udara sejalan dengan bertambahnya kebutuhan energi listrik untuk mendukung berbagai fasilitas, seperti terminal penumpang, sistem pencahayaan, pendingin ruangan, pompa air, sistem keamanan, navigasi, serta fasilitas pendukung lainnya. Kebutuhan tersebut berlangsung secara kontinu sehingga keandalan dan efisiensi pasokan energi menjadi salah satu aspek penting dalam pengelolaan bandar udara. Di sisi lain, ketergantungan terhadap sumber energi konvensional masih menjadi tantangan karena berkaitan dengan biaya operasional dan dampak lingkungan. Kondisi tersebut mendorong penerapan konsep green airport melalui peningkatan efisiensi energi dan pemanfaatan sumber energi terbarukan yang tersedia di lingkungan bandar udara.

Salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi dimanfaatkan adalah energi air. Energi air dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan memanfaatkan energi potensial dan kinetik aliran air untuk menggerakkan turbin yang terhubung dengan generator. Teknologi mikrohidro memiliki keunggulan berupa konstruksi yang relatif sederhana, biaya operasional yang rendah, serta dapat menghasilkan energi secara kontinu selama tersedia aliran air dengan karakteristik yang sesuai. Mikrohidro dan minihidro juga memiliki potensi pengembangan karena membutuhkan ruang yang relatif kecil dan dapat menjadi sumber energi alternatif dengan biaya pengembangan yang lebih rendah [1].

Potensi tersebut dapat dikembangkan pada pond penampungan air di kawasan bandar udara yang memiliki potensi aliran air yang dapat dimanfaatkan. Air yang tertampung atau dialirkan pada sistem tersebut pada umumnya belum dimanfaatkan sebagai sumber energi sehingga terdapat peluang untuk mengonversi sebagian energi alirannya menjadi energi listrik. Pemanfaatan sumber air tersebut tidak hanya berpotensi menghasilkan energi terbarukan, tetapi juga dapat meningkatkan nilai guna infrastruktur pengelolaan air yang telah tersedia. Dengan demikian, penerapan PLTMH pada pond penampungan air dapat menjadi salah satu alternatif pemanfaatan sumber daya lokal untuk mendukung efisiensi energi di kawasan bandar udara.

Pemilihan jenis turbin merupakan salah satu faktor penting dalam perancangan PLTMH karena harus disesuaikan dengan karakteristik sumber air, terutama debit dan tinggi jatuh air (head). Turbin Pelton merupakan salah satu turbin impuls yang sesuai untuk kondisi head relatif tinggi dengan debit yang dapat dikendalikan melalui nosel. Energi potensial air yang tersedia akibat perbedaan ketinggian dikonversi menjadi energi kinetik melalui nosel, kemudian jet air diarahkan menuju sudu (bucket) turbin sehingga menghasilkan putaran mekanis yang selanjutnya digunakan untuk menggerakkan generator. Secara teoritis, potensi daya hidrolik yang tersedia dipengaruhi oleh debit air, tinggi jatuh air, dan percepatan gravitasi, sedangkan daya listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh efisiensi keseluruhan sistem.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan PLTMH berbasis Turbin Pelton. Prabowo dkk. [2] membahas PLTMH menggunakan Turbin Pelton dengan fokus pada kinerja sistem pembangkit. Rahman dkk. [3] melakukan penelitian mengenai rancang bangun PLTMH menggunakan Turbin Pelton, sedangkan Rozak dkk. [4] menganalisis hubungan putaran turbin terhadap tegangan generator. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa Turbin Pelton dapat digunakan sebagai penggerak pada sistem mikrohidro dan bahwa karakteristik putaran turbin memiliki hubungan dengan keluaran listrik generator. Namun, penelitian yang mengintegrasikan Turbin Pelton dengan sumber air pada pond penampungan di kawasan bandar udara masih terbatas. Selain itu, kajian yang secara khusus mengevaluasi karakteristik keluaran prototipe PLTMH pada kondisi debit dan tinggi jatuh air yang tersedia di lingkungan bandar udara masih terbatas.

Kesenjangan tersebut menunjukkan perlunya penelitian yang tidak hanya membahas penggunaan Turbin Pelton sebagai penggerak generator, tetapi juga menguji penerapannya pada karakteristik sumber air yang terdapat di lingkungan bandar udara. Kebaruan penelitian ini terletak pada perancangan dan pembangunan prototipe PLTMH berbasis Turbin Pelton yang memanfaatkan karakteristik aliran air pada pond penampungan sebagai dasar perancangan, serta pengujian kinerja sistem pada kondisi

debit dan head yang tersedia. Parameter kinerja yang diamati meliputi kecepatan putaran turbin, tegangan, arus, dan daya listrik yang dihasilkan. Hasil pengujian tersebut digunakan untuk mengetahui karakteristik operasi sistem dan menentukan kondisi yang menghasilkan keluaran listrik paling optimal.

Berdasarkan permasalahan dan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem PLTMH berbasis Turbin Pelton pada pond penampungan air di bandar udara serta menganalisis kinerja sistem berdasarkan karakteristik debit dan tinggi jatuh air yang tersedia. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai potensi pemanfaatan sumber air pada kawasan bandar udara sebagai sumber energi terbarukan serta menjadi salah satu alternatif teknologi pendukung penerapan konsep green airport.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan sistem pembangkit listrik skala kecil yang memanfaatkan energi air untuk menghasilkan energi listrik. Prinsip kerja PLTMH adalah mengubah energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik melalui turbin, kemudian energi mekanik tersebut dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator. Besarnya energi yang dapat dimanfaatkan dipengaruhi oleh karakteristik sumber air, terutama debit aliran (flow rate) dan tinggi jatuh air (head).

Komponen utama PLTMH terdiri atas sumber air, saluran atau pipa pembawa air, turbin, poros atau sistem transmisi, generator, dan beban listrik. Air yang memiliki energi potensial akibat perbedaan elevasi dialirkan menuju turbin sehingga menghasilkan gaya pada sudu dan menyebabkan turbin berputar. Putaran turbin kemudian diteruskan ke generator untuk menghasilkan energi listrik. Dengan prinsip tersebut, PLTMH dapat digunakan sebagai salah satu alternatif pemanfaatan energi air pada sumber aliran yang tersedia secara kontinu [2], [5].

Kinerja PLTMH sangat dipengaruhi oleh kesesuaian antara karakteristik sumber air dengan jenis turbin yang digunakan. Oleh karena itu, parameter debit dan tinggi jatuh air

menjadi dasar dalam menentukan potensi daya hidrolik serta konfigurasi sistem pembangkit. Dalam penelitian ini, konsep PLTMH digunakan sebagai dasar dalam merancang prototipe pembangkit yang memanfaatkan aliran air pada pond penampungan air di bandar udara.

2.2. Konversi Energi Air

Konversi energi air merupakan proses perubahan energi yang terkandung dalam aliran air menjadi energi mekanik melalui turbin, kemudian energi mekanik tersebut dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator. Energi air dapat berasal dari energi potensial akibat perbedaan ketinggian dan energi kinetik akibat pergerakan aliran. Pada sistem PLTMH, energi tersebut dimanfaatkan untuk menghasilkan putaran pada turbin yang selanjutnya diteruskan ke generator.

Besarnya daya hidrolik yang tersedia pada aliran air dapat dihitung berdasarkan hubungan antara massa jenis air, debit, percepatan gravitasi, dan tinggi jatuh air (head), yang dinyatakan dengan persamaan:

$$P_h = \rho \times g \times Q \times H$$

dengan:

P_h = daya hidrolik (W)

ρ = massa jenis air (kg/m^3)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Q = debit air (m^3/s)

H = tinggi jatuh air atau head (m)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa daya hidrolik yang tersedia berbanding lurus dengan debit air dan tinggi jatuh air. Semakin besar debit dan head, semakin besar pula potensi energi air yang dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin. Dalam kondisi aktual, daya keluaran generator dapat berbeda dari potensi daya hidrolik karena adanya kehilangan energi selama proses konversi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini hubungan antara debit, head, putaran turbin, serta keluaran listrik digunakan sebagai dasar untuk menganalisis kinerja sistem PLTMH.

2.3. Turbin Pelton

Turbin Pelton merupakan turbin impuls yang mengubah energi hidrolik air menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Turbin ini bekerja dengan memanfaatkan pancaran air berkecepatan tinggi yang diarahkan melalui nosel menuju sudu (bucket) pada runner.

Perubahan momentum aliran air ketika mengenai sudu menghasilkan gaya tangensial yang menyebabkan runner berputar. Putaran tersebut kemudian diteruskan melalui poros untuk menggerakkan generator [6].

Pada sistem Turbin Pelton, air dari sumber dialirkan melalui pipa pesat (penstock) menuju nosel. Nosel mengubah tekanan atau energi potensial air menjadi energi kinetik dalam bentuk jet air. Jet tersebut diarahkan ke sudu runner sehingga menghasilkan putaran. Setelah memberikan energi kepada runner, air keluar dari turbin dan diteruskan menuju saluran pembuangan.

Turbin Pelton umumnya digunakan pada kondisi head relatif tinggi dan debit relatif rendah. Meskipun Turbin Pelton secara umum digunakan pada kondisi head relatif tinggi dan debit relatif rendah, pada penelitian ini Turbin Pelton digunakan pada skala prototipe untuk mengevaluasi kemampuan konversi energi pada kondisi head yang tersedia. Oleh karena itu, hasil penelitian ditujukan untuk menggambarkan karakteristik kinerja prototipe pada kondisi pengujian yang digunakan. Kecepatan putaran turbin juga menjadi salah satu parameter penting karena berhubungan dengan energi mekanik yang diteruskan ke generator.

Dalam penelitian ini, Turbin Pelton digunakan sebagai pengubah energi aliran air menjadi energi mekanik. Pengujian dilakukan pada kondisi debit dan tinggi jatuh air yang ditetapkan berdasarkan karakteristik sistem, kemudian diamati respons putaran turbin dan keluaran listrik generator.

2.4. Generator Listrik

Generator merupakan mesin listrik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Pada sistem PLTMH, energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin diteruskan melalui poros menuju generator sehingga menghasilkan tegangan dan arus listrik.

Generator DC (Direct Current) menghasilkan energi listrik dalam bentuk arus searah. Generator ini dapat digunakan pada sistem pembangkit skala kecil karena konstruksinya relatif sederhana dan keluaran listriknya dapat digunakan secara langsung pada beban DC maupun sistem penyimpanan energi yang sesuai. Tegangan keluaran

generator dipengaruhi oleh karakteristik generator dan kecepatan putaran poros.

Hubungan antara turbin dan generator menjadi bagian penting dalam sistem konversi energi. Ketika debit air meningkat dan menghasilkan gaya yang lebih besar pada runner, kecepatan putaran turbin dapat meningkat. Peningkatan putaran tersebut selanjutnya dapat memengaruhi tegangan dan daya keluaran generator. Oleh karena itu, kecepatan putaran turbin, tegangan, arus, dan daya listrik digunakan sebagai parameter untuk mengevaluasi kinerja sistem pada penelitian ini.

2.5. Debit dan Tinggi Jatuh Air

Debit air dan tinggi jatuh air (head) merupakan parameter penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Kinerja sistem PLTMH dipengaruhi oleh karakteristik sumber air, khususnya laju debit dan ketinggian jatuh air. Semakin besar laju debit air dan tinggi jatuh air (head), semakin besar pula potensi energi air yang dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan energi listrik [5].

Pada proses konversi energi, debit air berhubungan dengan energi kinetik yang digunakan untuk menggerakkan sudu (bucket) Turbin Pelton. Peningkatan debit aliran dapat meningkatkan kecepatan aliran dan gaya dorong pada sudu turbin sehingga memengaruhi kecepatan putaran turbin (RPM). Perubahan putaran turbin selanjutnya dapat memengaruhi tegangan dan daya listrik yang dihasilkan generator [7].

3. METODE PENELITIAN

3.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan pendekatan Engineering Design Process (EDP) sebagai kerangka dalam proses rancang bangun sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Penelitian dilaksanakan di wilayah Kampus 1 dan Kampus 2 Politeknik Penerbangan Makassar. Kegiatan penelitian meliputi perancangan, pembuatan prototipe, pengujian, pengambilan data, dan analisis hasil pengujian.

Metode ini digunakan untuk mengembangkan prototipe pembangkit yang memanfaatkan aliran air pada pond penampungan bandar udara sebagai sumber energi. Tahapan penelitian meliputi Ask,

Imagine, Plan, Create, Test and Improve, serta Share [8].

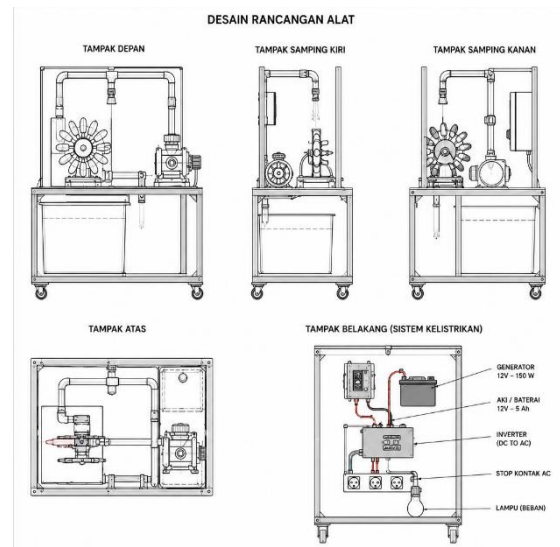
Tahap Ask dilakukan melalui observasi untuk mengidentifikasi permasalahan dan kebutuhan sistem. Tahap Imagine dilakukan melalui studi literatur untuk menentukan alternatif solusi dan komponen yang sesuai. Tahap Plan meliputi perancangan sistem, baik perangkat mekanik maupun sistem pembangkitan. Tahap Create dilakukan dengan merealisasikan rancangan menjadi prototipe PLTMH. Selanjutnya, tahap Test and Improve dilakukan melalui pengujian kinerja alat dan perbaikan apabila ditemukan ketidaksesuaian. Tahap Share dilakukan dengan menganalisis dan menyajikan hasil pengujian sebagai dasar evaluasi kinerja sistem.

3.2. Perancangan Alat

Sistem yang dirancang merupakan prototipe PLTMH yang memanfaatkan aliran air sebagai sumber energi untuk menggerakkan turbin Pelton dan generator. Sistem terdiri atas saluran air, turbin Pelton, sistem transmisi, generator Permanent Magnet Generator (PMG), aki, inverter, dan lampu sebagai beban.

3.2.1. Desain alat

Perancangan sistem dilakukan berdasarkan alur konversi energi dari aliran air menjadi energi listrik. Air dialirkan menuju turbin Pelton melalui pipa dan nozzle. Aliran air tersebut menghasilkan putaran pada turbin yang kemudian diteruskan melalui sistem transmisi menuju generator. Energi listrik yang dihasilkan generator disimpan pada aki dan selanjutnya dialirkan melalui inverter menuju beban.

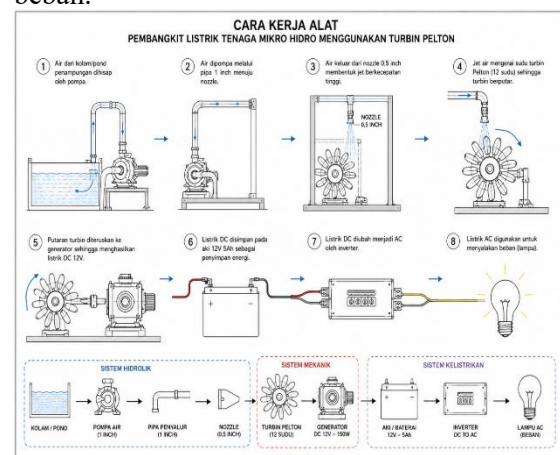


Gambar 1 Desain rancangan alat

3.2.2. Cara kerja alat

Pompa digunakan untuk mensirkulasikan air dan menyediakan kondisi aliran yang diperlukan selama pengujian prototipe. Air kemudian dialirkan menuju nozzle berdiameter 0,5 inci sehingga menghasilkan semburan air yang diarahkan ke sudu turbin Pelton. Turbin yang memiliki 12 sudu mengubah energi aliran air menjadi energi mekanik berupa putaran poros.

Putaran turbin diteruskan menuju generator PMG 12 V dengan kapasitas 150 W menggunakan sistem transmisi pulley dan belt. Generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan kemudian disimpan pada aki 12 V 5 Ah. Selanjutnya, energi dari aki diubah oleh inverter dari 12 V DC menjadi 220 V AC dan digunakan untuk menyalakan lampu LED 5 W sebagai beban.



Gambar 2 Cara kerja alat

3.2.3. *Komponen alat*

Komponen utama yang digunakan dalam prototipe PLTMH meliputi pipa PVC, turbin Pelton, generator PMG, sistem transmisi pulley dan belt, inverter, aki, lampu LED, dan pompa air.

Pipa PVC yang digunakan berjenis PVC AW berdiameter 1 inci dengan panjang 280 cm dan berfungsi mengalirkan air dari bak penampungan menuju turbin. Turbin yang digunakan adalah turbin Pelton dengan diameter runner 15 cm dan 12 bucket. Material bucket menggunakan 3D printing berbahan PLA/PETG dengan head operasi 0,25 m.

Generator yang digunakan merupakan tipe PMG dengan tegangan keluaran 12 V dan daya 150 W. Generator dihubungkan dengan turbin menggunakan sistem transmisi pulley dan belt dengan rasio 1:3 untuk meningkatkan kecepatan putaran pada sisi generator.

Energi listrik dari generator disimpan pada aki 12 V 5 Ah sebelum diteruskan menuju inverter. Inverter yang digunakan memiliki masukan 12 V DC dan keluaran 220 V AC dengan kapasitas daya maksimum 150 W. Beban yang digunakan berupa lampu LED 5 W. Pompa air 220 V AC dengan kapasitas aliran maksimum 340 L/menit digunakan untuk mensirkulasikan air selama pengujian, sedangkan debit aktual yang digunakan dalam pengujian diukur secara volumetrik.

3.3. *Teknik Pengujian*

Pengujian dilakukan secara eksperimental untuk mengetahui kinerja prototipe PLTMH pada kondisi debit dan head yang ditetapkan berdasarkan karakteristik sistem. Parameter yang diamati meliputi debit aliran air, kecepatan putaran turbin, tegangan keluaran generator, arus keluaran, dan daya listrik. Pengujian juga dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam melakukan konversi energi serta mengevaluasi efisiensi sistem.

Pengukuran debit air dilakukan menggunakan metode volumetrik dengan menampung air pada wadah ukur dan mencatat waktu pengisian. Debit dihitung berdasarkan perbandingan volume air terhadap waktu pengisian.

Pengujian kecepatan putaran dilakukan menggunakan tachometer untuk mengetahui putaran turbin akibat tumbukan jet air dari nozzle. Pengujian tegangan dilakukan menggunakan voltmeter pada terminal keluaran

generator, sedangkan pengukuran arus dilakukan untuk mengetahui arus listrik yang dihasilkan generator.

Daya listrik keluaran dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus. Selain itu, daya hidrolik dihitung berdasarkan debit air dan head yang digunakan dalam sistem. Nilai daya hidrolik selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menentukan efisiensi konversi keseluruhan sistem, yaitu perbandingan antara daya listrik keluaran dengan daya hidrolik yang tersedia.

Pengujian dilakukan pada kondisi debit dan head yang ditetapkan berdasarkan karakteristik sistem, kemudian diamati respons putaran turbin dan keluaran listrik yang dihasilkan. Data hasil pengujian dicatat dalam tabel untuk selanjutnya dianalisis secara kuantitatif.

3.4. *Teknik Analisis Data*

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan analisis deskriptif kuantitatif. Analisis dilakukan dengan mengevaluasi hubungan antara putaran turbin dan keluaran listrik serta karakteristik kinerja sistem pada debit dan head yang digunakan dalam pengujian.

Hubungan antara putaran turbin dan keluaran listrik dianalisis untuk mengetahui respons generator terhadap perubahan kondisi operasi turbin. Selanjutnya, putaran turbin dibandingkan dengan tegangan dan arus keluaran generator untuk mengetahui respons generator terhadap perubahan putaran.

Daya listrik ditentukan berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus. Sementara itu, daya hidrolik digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengubah energi air menjadi energi listrik. Efisiensi sistem dihitung dengan membandingkan daya listrik keluaran generator terhadap daya hidrolik yang tersedia.

Hasil pengujian kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk menunjukkan karakteristik kinerja sistem pada setiap kondisi pengujian. Analisis tersebut digunakan untuk menentukan kondisi operasi yang menghasilkan kinerja terbaik serta mengidentifikasi faktor yang memengaruhi keluaran sistem PLTMH.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

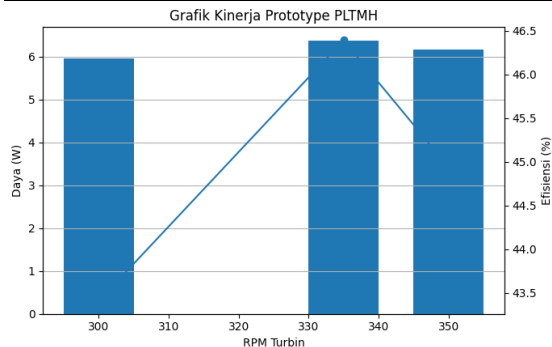
4.1. *Hasil Pengujian*

4.1.1. *Hasil pengujian prototipe*

Pengujian prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengonversi energi aliran air menjadi energi listrik. Parameter yang diamati meliputi debit aliran, putaran turbin, tegangan, arus, daya listrik, dan efisiensi sistem. Pengujian dilakukan pada debit air yang relatif konstan sebesar $0,0056 \text{ m}^3/\text{s}$ dan head sebesar $0,25 \text{ m}$. Selama pengoperasian, diperoleh beberapa kondisi putaran turbin yang kemudian digunakan untuk menganalisis respons keluaran listrik generator.

Tabel 1 Hasil pengujian prototipe

No	Debit (m^3/s)	RPM Turbin	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Efisiensi (%)
1	0,0056	300	12,41	0,48	5,96	43,41
2	0,0056	335	12,73	0,50	6,37	46,39
3	0,0056	350	12,60	0,49	6,17	44,94



Gambar 3 Grafik kinerja prototipe

Hasil pengujian menunjukkan bahwa prototipe mampu menghasilkan tegangan sebesar $12,41\text{--}12,73 \text{ V}$, arus sebesar $0,48\text{--}0,50 \text{ A}$, dan daya listrik sebesar $5,96\text{--}6,37 \text{ W}$. Kinerja tertinggi diperoleh pada putaran turbin 335 rpm dengan tegangan $12,73 \text{ V}$, arus $0,50 \text{ A}$, daya $6,37 \text{ W}$, dan efisiensi sistem sebesar $46,39\%$.

Menariknya, peningkatan putaran dari 300 rpm menjadi 335 rpm meningkatkan daya keluaran dari $5,96 \text{ W}$ menjadi $6,37 \text{ W}$. Namun, ketika putaran meningkat menjadi 350 rpm , daya justru menurun menjadi $6,17 \text{ W}$. Pola yang sama terlihat pada efisiensi, yaitu meningkat dari $43,41\%$ pada 300 rpm menjadi $46,39\%$ pada 335 rpm , kemudian menurun menjadi $44,94\%$ pada 350 rpm . Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki kondisi operasi optimum dan peningkatan putaran tidak selalu menghasilkan peningkatan daya listrik.

4.2. Pembahasan Hasil Pengujian

4.2.1. Kinerja perancangan sistem PLTMH menggunakan turbin Pelton pada pond penampungan air

Hasil penelitian menunjukkan bahwa prototipe PLTMH yang dirancang mampu mengonversi energi aliran air menjadi energi listrik dan menghasilkan daya maksimum sebesar $6,37 \text{ W}$. Sistem menggunakan turbin Pelton sebagai pengubah energi hidrolik menjadi energi mekanik dan generator sebagai pengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Konfigurasi tersebut memungkinkan energi air dari pond penampungan dimanfaatkan melalui rangkaian konversi energi secara bertahap.

Berdasarkan hasil pengukuran, debit air yang digunakan sebesar $0,0056 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan head sebesar $0,25 \text{ m}$. Berdasarkan hubungan antara debit, head, dan daya hidrolik, daya hidrolik tersedia dapat dihitung menggunakan:

$$P_h = \rho \times g \times Q \times H$$

dengan $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $Q = 0,0056 \text{ m}^3/\text{s}$, dan $H = 0,25 \text{ m}$. Berdasarkan parameter tersebut diperoleh daya hidrolik sebesar $13,73 \text{ W}$.

Nilai tersebut merupakan daya teoritis yang tersedia dari aliran air sebelum memperhitungkan berbagai kehilangan energi pada sistem. Dengan daya listrik maksimum sebesar $6,37 \text{ W}$, prototipe mampu memanfaatkan sekitar $46,39\%$ dari daya hidrolik yang tersedia. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem telah mampu melakukan proses konversi energi secara nyata, meskipun sebagian energi masih hilang pada proses aliran, turbin, transmisi, dan generator.

Kinerja tersebut berkaitan dengan karakteristik turbin Pelton yang memanfaatkan energi kinetik jet air untuk menghasilkan gaya impuls pada bucket. Air yang keluar dari nozzle diarahkan menuju sudu turbin sehingga menghasilkan putaran pada runner. Pada kondisi penelitian, debit dan head yang tersedia mampu menghasilkan putaran turbin antara $300\text{--}350 \text{ rpm}$. Putaran tersebut selanjutnya diteruskan ke generator melalui sistem transmisi pulley dan belt.

Kecepatan teoritis pancaran air dari head $0,25 \text{ m}$ dapat diperkirakan menggunakan hubungan Bernoulli, yaitu:

$$v = \sqrt{2gH}$$

Dengan memasukkan nilai head 0,25 m dan percepatan gravitasi $9,81 \text{ m/s}^2$, diperoleh kecepatan teoritis sekitar $2,21 \text{ m/s}$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa secara teoritis head 0,25 m menghasilkan kecepatan jet sekitar $2,21 \text{ m/s}$. Pada kondisi aktual, jet tersebut masih mampu menghasilkan putaran pada runner, sebagaimana ditunjukkan oleh hasil pengujian. Namun, nilai aktual dapat berbeda dari kondisi teoritis karena adanya kehilangan energi akibat gesekan pada pipa, sambungan, nozzle, turbulensi, dan kondisi aliran.

Nozzle berdiameter 0,5 inci digunakan untuk mengarahkan aliran menuju bucket turbin. Pada sistem turbin Pelton, nozzle berperan penting dalam mengubah energi tekanan menjadi energi kinetik sekaligus mengarahkan jet air agar mengenai bucket secara efektif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konfigurasi nozzle yang digunakan mampu menghasilkan aliran yang cukup untuk menggerakkan runner hingga 350 rpm. Hal tersebut ditunjukkan oleh kemampuan sistem menghasilkan daya listrik hingga 6,37 W.

Kinerja runner juga terlihat dari putaran turbin yang dihasilkan. Pada kondisi optimum, turbin berputar sebesar 335 rpm dan menghasilkan daya listrik tertinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa terdapat titik operasi tertentu ketika energi dari jet air dapat diterima runner dan diteruskan ke generator secara lebih efektif. Apabila putaran meningkat melewati kondisi tersebut, peningkatan kecepatan putar tidak lagi menghasilkan peningkatan daya. Kondisi tersebut dapat dikaitkan dengan meningkatnya rugi-rugi mekanik dan ketidaksempurnaan proses transfer energi antara jet air dan bucket.

Generator yang digunakan berfungsi mengubah energi mekanik hasil putaran turbin menjadi energi listrik. Hasil pengujian menunjukkan tegangan keluaran berada pada rentang 12,41–12,73 V. Tegangan tertinggi diperoleh pada putaran 335 rpm. Secara teoritis, tegangan induksi generator dipengaruhi oleh kecepatan putaran dan fluks magnet, sehingga perubahan putaran turbin dapat memengaruhi tegangan keluaran generator.

Hubungan tersebut terlihat pada hasil pengujian. Ketika putaran meningkat dari 300 rpm menjadi 335 rpm, tegangan meningkat dari 12,41 V menjadi 12,73 V. Namun, pada putaran 350 rpm tegangan turun menjadi 12,60 V.

Penurunan tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara putaran dan keluaran generator pada kondisi aktual tidak selalu linier. Selain karakteristik generator, kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh rugi-rugi mekanik pada sistem transmisi, gesekan bantalan, serta karakteristik beban yang terhubung pada generator.

4.2.2. Karakteristik kinerja turbin Pelton pada kondisi debit dan head pengujian

Debit dan head merupakan dua parameter utama yang menentukan besarnya energi hidrolik yang tersedia pada sistem PLTMH. Hubungan keduanya dinyatakan melalui persamaan:

$$P_h = \rho \times g \times Q \times H$$

Berdasarkan hasil penelitian, debit sebesar $0,0056 \text{ m}^3/\text{s}$ dan head sebesar 0,25 m menghasilkan daya hidrolik sebesar 13,73 W. Nilai tersebut menjadi batas teoritis energi yang tersedia sebelum terjadi proses konversi dan kehilangan energi pada komponen sistem.

Debit sebesar $0,0056 \text{ m}^3/\text{s}$ setara dengan sekitar 5,6 liter air per detik. Pada turbin Pelton, peningkatan debit akan meningkatkan jumlah massa air yang mengenai bucket dalam satuan waktu. Kondisi tersebut secara teoritis dapat meningkatkan gaya impuls dan energi yang diterima runner. Dengan demikian, debit memiliki hubungan langsung dengan kemampuan turbin dalam menghasilkan energi mekanik.

Namun, pada penelitian ini variasi debit belum dilakukan secara independen karena pengujian dilakukan pada debit yang relatif konstan. Oleh karena itu, pengaruh debit terhadap kinerja sistem tidak dapat dinyatakan sebagai hubungan eksperimental langsung. Hasil penelitian lebih tepat menunjukkan bahwa pada debit $0,0056 \text{ m}^3/\text{s}$, sistem mampu menghasilkan putaran 300–350 rpm dan daya listrik maksimum 6,37 W. Hal ini penting ditegaskan agar interpretasi hasil tidak melebihi kondisi eksperimen yang sebenarnya.

Selain debit, head juga menentukan energi yang tersedia pada aliran air. Hubungan head dengan kecepatan teoritis aliran dapat dinyatakan sebagai:

$$v = \sqrt{2gH}$$

Pada head 0,25 m diperoleh kecepatan teoritis sebesar $2,21 \text{ m/s}$. Peningkatan head secara teoritis akan meningkatkan kecepatan jet

air dan daya hidrolik yang tersedia. Sebaliknya, penurunan head akan mengurangi energi yang dapat dimanfaatkan oleh turbin. Oleh karena itu, head menjadi salah satu faktor penting dalam menentukan kemampuan turbin Pelton untuk menghasilkan putaran dan daya.

Hubungan antara putaran turbin dan tegangan generator ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil putaran rpm ke tegangan

Putaran (rpm)	Tegangan (V)
300	12,41
335	12,73
350	12,60

Berdasarkan tabel tersebut, tegangan meningkat dari 12,41 V pada 300 rpm menjadi 12,73 V pada 335 rpm. Akan tetapi, pada 350 rpm tegangan turun menjadi 12,60 V. Temuan ini menunjukkan bahwa putaran 335 rpm merupakan kondisi operasi yang menghasilkan keluaran tegangan paling tinggi. Penurunan pada 350 rpm menunjukkan bahwa peningkatan putaran pada kondisi pengujian tersebut tidak lagi meningkatkan keluaran listrik.

Pola yang serupa ditemukan pada arus keluaran sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil putaran rpm ke arus

Putaran (rpm)	Arus (A)
300	0,48
335	0,50
350	0,49

Arus meningkat dari 0,48 A pada 300 rpm menjadi 0,50 A pada 335 rpm, kemudian sedikit menurun menjadi 0,49 A pada 350 rpm. Perubahan tersebut memperkuat hasil bahwa kondisi 335 rpm merupakan titik operasi terbaik dari pengujian yang dilakukan.

Daya listrik diperoleh dari hasil perkalian tegangan dan arus. Pada 300 rpm, daya yang dihasilkan sebesar 5,96 W. Pada 335 rpm, daya meningkat menjadi 6,37 W, sedangkan pada 350 rpm daya turun menjadi 6,17 W. Dengan demikian, daya maksimum sebesar 6,37 W diperoleh pada 335 rpm.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa pada rentang putaran yang diuji, peningkatan putaran turbin tidak selalu diikuti peningkatan daya listrik. Peningkatan putaran hanya meningkatkan daya hingga titik tertentu, setelah itu daya mengalami penurunan. Kondisi ini

dapat terjadi karena peningkatan rugi-rugi mekanik pada putaran yang lebih tinggi, seperti gesekan pada bantalan dan transmisi pulley-belt, serta adanya ketidaksempurnaan transfer energi dari jet air ke bucket turbin.

Efisiensi sistem dihitung dengan membandingkan daya listrik keluaran dengan daya hidrolik yang tersedia. Hasil pengujian menunjukkan efisiensi sebesar 43,41% pada 300 rpm, meningkat menjadi 46,39% pada 335 rpm, kemudian menurun menjadi 44,94% pada 350 rpm. Efisiensi tertinggi sebesar 46,39% menunjukkan bahwa kondisi 335 rpm merupakan kondisi paling efektif dalam memanfaatkan energi hidrolik yang tersedia.

Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa tidak semua energi hidrolik dapat dikonversi menjadi energi listrik. Pada kondisi optimum, dari daya hidrolik sebesar 13,73 W hanya 6,37 W yang berhasil dikonversi menjadi daya listrik. Selisih tersebut menunjukkan adanya rugi-rugi energi sebesar sekitar 7,36 W atau 53,61% dari daya hidrolik pada kondisi pengujian terbaik. Dengan demikian, angka rugi daya perlu dibedakan berdasarkan masing-masing kondisi pengujian dan tidak dinyatakan sebagai nilai rata-rata 7,56 W atau 55,08% apabila perhitungannya belum ditampilkan dan diverifikasi.

Rugi-rugi energi dalam sistem dapat berasal dari beberapa tahapan. Pada sisi hidrolik, kehilangan energi terjadi akibat gesekan pada pipa, sambungan, dan nozzle. Pada turbin, sebagian energi jet air tidak sepenuhnya ditransfer menjadi energi mekanik akibat percikan, turbulensi, dan ketidaktepatan tumbukan terhadap bucket. Selanjutnya, pada sistem transmisi terdapat rugi mekanik akibat gesekan bantalan, slip belt, dan ketidaksejajaran poros. Pada generator, sebagian energi mekanik juga hilang dalam bentuk rugi-rugi listrik dan panas.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa prototipe PLTMH menggunakan turbin Pelton mampu menghasilkan daya listrik maksimum sebesar 6,37 W pada debit 0,0056 m³/s, head 0,25 m, dan putaran turbin 335 rpm. Daya keluaran generator maksimum sebesar 6,37 W lebih besar daripada daya nominal lampu LED sebesar 5 W. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keluaran generator secara nominal mencukupi untuk memenuhi kebutuhan daya

beban yang digunakan, meskipun terdapat rugi-rugi pada tahap penyimpanan dan konversi melalui aki serta inverter.

Temuan penelitian ini memiliki implikasi bahwa pemanfaatan aliran air pada pond penampungan dapat dikembangkan sebagai sumber energi alternatif berskala kecil, khususnya untuk kebutuhan beban berdaya rendah. Namun, karena penelitian menggunakan debit yang relatif konstan dan head rendah, pengembangan berikutnya perlu menguji beberapa variasi debit dan head secara terkontrol. Pengujian tersebut diperlukan untuk memperoleh karakteristik performa turbin secara lebih komprehensif dan menentukan kondisi operasi yang menghasilkan efisiensi terbaik.

Dari sisi implementasi, hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi turbin Pelton, nozzle, sistem transmisi, dan generator yang digunakan telah mampu menghasilkan energi listrik pada skala prototipe. Sementara dari sisi keilmuan, hasil ini memperlihatkan bahwa keberhasilan konversi energi pada sistem mikrohidro tidak hanya ditentukan oleh besarnya debit dan head, tetapi juga oleh kesesuaian antara karakteristik aliran, desain turbin, rasio transmisi, karakteristik generator, dan kondisi beban.

5. KESIMPULAN

- a. Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) berbasis Turbin Pelton berhasil dirancang dan dibangun dengan memanfaatkan aliran air yang disirkulasikan dari pond penampungan sebagai sumber energi. Sistem terdiri atas turbin Pelton, sistem transmisi pulley dan belt, generator PMG, aki, inverter, dan beban lampu LED 5 W.
- b. Pada kondisi pengujian dengan debit air sebesar $0,0056 \text{ m}^3/\text{s}$ dan head sebesar 0,25 m, prototipe mampu menghasilkan putaran turbin sebesar 300–350 rpm, tegangan sebesar 12,41–12,73 V, arus sebesar 0,48–0,50 A, dan daya listrik sebesar 5,96–6,37 W. Kinerja terbaik diperoleh pada putaran 335 rpm dengan tegangan 12,73 V, arus 0,50 A, dan daya listrik maksimum 6,37 W.
- c. Daya hidrolik yang tersedia pada kondisi pengujian sebesar 13,73 W, sedangkan daya listrik maksimum yang dihasilkan

sebesar 6,37 W, sehingga diperoleh efisiensi konversi tertinggi sebesar 46,39%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa prototipe telah mampu mengonversi sebagian energi hidrolik menjadi energi listrik, meskipun masih terdapat kehilangan energi pada proses aliran, turbin, transmisi, dan generator.

- d. Kelebihan prototipe terletak pada konstruksinya yang relatif sederhana serta kemampuannya memanfaatkan sumber air yang tersedia untuk menghasilkan energi listrik pada skala kecil. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan karena pengujian dilakukan pada satu kondisi debit dan head, sehingga pengaruh variasi debit dan head terhadap kinerja turbin belum dapat ditentukan secara eksperimental.
- e. Pengembangan selanjutnya dapat dilakukan dengan menguji beberapa variasi debit dan head secara terkontrol, serta mengoptimalkan diameter nozzle, desain bucket, rasio transmisi, dan karakteristik generator. Pengujian juga dapat diperluas dengan mengevaluasi efisiensi setiap tahapan konversi energi, termasuk penyimpanan pada aki dan konversi melalui inverter, sehingga karakteristik kinerja prototipe dapat diketahui secara lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait di Politeknik Penerbangan Makassar yang telah memberikan dukungan, fasilitas, dan bantuan selama proses perancangan, pengujian, pengambilan data, hingga penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Taqwanur and M. B. Suryawantiningtyas, "Analisis Kecacatan Produk dengan Menggunakan Quality Control Circle dan Seven QC Tools di PT. ACL," *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 6, no. 2, pp. 191–200, 2022, doi: <https://doi.org/10.33379/gtech.v6i2.1589>.
- [2] F. I. Prabowo, A. F. Syahla, Y. A. Saputra, A. R. Kurniadi, A. Stefanie, and D. B. Santoso, "No Title," *TESLA J. Tek. Elektro*, vol. 26, no. 2, pp. 158–167, 2025, [Online]. Available: <https://journal.untar.ac.id/index.php/tesla/article/view/32608>
- [3] A. H. Valuby, Y. Shalahudin, F. Yumono, and

- R. F. Rizal, "Rancang Bangun PLTMH Menggunakan Turbin Pelton," *J. Tek. Inform. dan Elektro*, vol. 4, no. 2, pp. 100–111, 2022, doi: <https://doi.org/10.55542/jurtie.v4i2.352>.
- [4] O. A. Rozak, A. Carmanto, A. Saputra, and T. Januario, "Pengaruh Kecepatan Angin Terhadap Tegangan Keluaran Generator DC pada Turbin Angin," *Electr. - J. Otomasi Kelistrikan dan Energi Terbarukan*, vol. 5, no. 1, pp. 10–19, 2023, doi: <https://doi.org/10.32722/ees.v5i1.5586>.
- [5] Sawirman and I. Nofri, "ANALISIS PENGARUH JUMLAH SUDU TURBIN TERHADAP KELUARAN DAYA LISTRIK PADA PEMBANGKIT LISTRIK PIKO HIDRO," *J. Telecommun. Electr. Sci.*, vol. 2, no. 02, pp. 1–7, 2025, doi: <https://doi.org/10.24010/jtels.v2i02.1269>.
- [6] H. E. P. Sarmo, A. Z. B. Ilmi, and A. D. K. Wardani, "Rancang Bangun Turbin Air Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro," *Swara Patra Maj. Ilm. PPSDM Migas*, vol. 13, no. 1, pp. 34–46, 2023, doi: <https://doi.org/10.37525/sp/2023-1/380>.
- [7] M. F. Yahya, Y. Apriani, Z. Saleh, and A. I. Lestari, "EVALUASI KINERJA TURBIN CROSSFLOW DENGAN JUMLAH SUDU 35," *J. SINTA Sist. Inf. Dan Teknol. Komputasi*, vol. 1, no. 1, pp. 41–48, 2024, doi: <https://doi.org/10.61124/sinta.v1i1.11>.
- [8] N. Sumiyati and F. Alatas, "Penguatan Kemampuan Engineering Design Process Melalui Pendekatan STEM Terpadu pada Pembelajaran Energi Terbarukan (Studi kasus pada salah satu SMA Negeri di Lamongan)," in *Prosiding Seminar Nasional FITK 2025*, 2025, pp. 88–108, doi: <https://doi.org/10.64277/semnas.v2i1.218>.