RANCANG BANGUN KONSTRUKSI TURBIN *MICRO HYDRO* SEBAGAI *SUPPLY* ENERGI ALTERNATIF PADA POS PERBATASAN PERSONEL TNI AD

Gamas Gery Samodra[1)], Koko Hadi Santoso[2)], Muhammad Rifqi Sepvian[3)]
[1),2)]Politeknik Angkatan Darat, Kota Batu, Jawa Timur
[3)]Politeknik Negeri Malang, Kota Malang, Jawa Timur
E – mail : gamassam22@gmail.com[1)]

ABSTRAK

Penelitian ini membahas rancang bangun konstruksi turbin *micro hydro* tipe Kaplan *fixed pitch* sebagai *supply* energi alternatif pada pos perbatasan personel TNI AD. Penelitian dilakukan melalui tahap perancangan teoritis, simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), *Finite Element Analysis* (FEA), fabrikasi, dan pengujian eksperimental. Variasi sudut sudu runner yang digunakan yaitu 15°, 20°, dan 25° pada kondisi *head* efektif 1,84 meter dengan variasi debit aliran rendah hingga tinggi. Parameter pengujian meliputi RPM turbin, torsi, daya mekanik, tegangan, arus, daya listrik, dan efisiensi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa turbin dengan sudut sudu 20° menghasilkan performa terbaik dibandingkan variasi lainnya dengan daya listrik maksimum sebesar 127,71 Watt dan efisiensi sistem sebesar 33,63%. Hasil simulasi CFD menunjukkan distribusi tekanan dan pola aliran fluida paling optimal terjadi pada sudut sudu 20°, sedangkan hasil FEA menunjukkan seluruh runner memiliki nilai *safety factor* lebih besar dari 2 sehingga konstruksi dinyatakan aman digunakan. Berdasarkan hasil penelitian, turbin *micro hydro* Kaplan *fixed pitch* mampu bekerja secara optimal pada kondisi *head* rendah dan berpotensi digunakan sebagai sumber energi alternatif pada wilayah terpencil khususnya pos perbatasan personel TNI AD.

Keyword : micro hydro, turbin Kaplan, CFD, FEA, energi alternatif, head rendah

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik pada pos perbatasan personel TNI AD masih menjadi tantangan karena sebagian wilayah belum terjangkau jaringan listrik dari PLN. Kondisi tersebut menyebabkan sebagian besar kebutuhan energi masih mengandalkan generator diesel yang memiliki konsumsi bahan bakar relatif tinggi, biaya operasional besar, serta memerlukan perawatan berkala. Keterbatasan akses energi listrik dapat berdampak terhadap keberlangsungan operasional peralatan pendukung, sistem penerangan, dan kebutuhan energi lainnya di wilayah perbatasan.[1]

Indonesia memiliki potensi sumber daya air yang cukup besar untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga mikrohidro, terutama pada daerah dengan aliran sungai yang memiliki debit relatif stabil meskipun memiliki head rendah. Sistem micro hydro menjadi salah satu alternatif energi terbarukan yang berpotensi diterapkan pada wilayah terpencil karena mampu menghasilkan energi listrik secara berkelanjutan dengan biaya operasional yang lebih rendah dibandingkan pembangkit berbasis bahan bakar fosil.[1]

Pada sistem micro hydro, pemilihan jenis turbin menjadi faktor penting yang memengaruhi performa konversi energi. Turbin Kaplan tipe fixed pitch dipilih karena memiliki karakteristik yang sesuai untuk kondisi debit besar dan head rendah, konstruksi relatif sederhana, serta memiliki kemampuan mempertahankan performa pada variasi aliran tertentu. Selain itu, turbin Kaplan memiliki efisiensi yang baik pada kondisi aliran rendah hingga sedang sehingga sesuai diterapkan pada sistem pembangkit skala kecil.[2]

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas performa turbin Kaplan dan pemanfaatannya pada sistem pembangkit micro hydro, namun kajian mengenai konstruksi runner serta validasi kekuatan struktur menggunakan pendekatan simulasi numerik masih terbatas. Analisis numerik menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) diperlukan untuk mengetahui karakteristik aliran fluida, distribusi tekanan, dan kecepatan aliran pada runner turbin, sedangkan Finite Element Analysis (FEA) digunakan untuk mengevaluasi kekuatan struktur, deformasi, serta tingkat keamanan konstruksi terhadap pembebanan operasi.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan menganalisis konstruksi turbin micro hydro sebagai supply energi alternatif pada pos perbatasan personel TNI AD dengan target menghasilkan daya listrik sekitar ±100 W. Penelitian dilakukan melalui pengujian eksperimental serta validasi simulasi CFD dan FEA untuk mengetahui karakteristik performa turbin sekaligus memastikan keamanan konstruksi runner selama operasi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Turbin Kaplan merupakan turbin reaksi aliran aksial yang bekerja optimal pada kondisi head rendah dengan debit besar. Menurut Ramalho dkk. [1], turbin axial-flow mampu beroperasi efektif pada very low head dengan konstruksi sederhana. Tamiri dkk. [2] menyatakan optimasi sudut sudu *runner* dapat meningkatkan efisiensi turbin Kaplan. Analisis CFD digunakan untuk mengetahui distribusi tekanan dan pola aliran fluida, sedangkan analisis FEA digunakan untuk mengetahui kekuatan struktur *runner* terhadap beban kerja. Daya teoritis PLTMH dapat dihitung menggunakan persamaan (P=ρgQH) dimana P adalah daya teoritis, ρ massa jenis air, g percepatan gravitasi, Q debit aliran, dan H tinggi jatuh efektif.

2.1. Landasan Teori

Pembangkit Listrik Tenaga *Micro Hydro* (PLTMH) merupakan sistem pembangkit listrik skala kecil [3] yang memanfaatkan energi potensial dan energi kinetik air untuk menghasilkan energi listrik. Sistem PLTMH terdiri dari beberapa komponen utama seperti saluran air, *penstock*, turbin, generator, dan sistem transmisi daya. Prinsip kerja PLTMH yaitu mengubah energi air menjadi energi mekanik melalui putaran turbin kemudian dikonversi menjadi energi listrik menggunakan generator. Teknologi ini banyak digunakan pada daerah terpencil karena memiliki biaya operasional rendah, ramah lingkungan, dan mampu beroperasi secara kontinu selama tersedia aliran air.[4]

Besarnya daya teoritis air pada sistem PLTMH dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P = \rho g Q H$$

Keterangan:

P : daya teoritis air (*Watt*)
ρ : massa jenis air (kg/m^3)
g : percepatan gravitasi (9,81 m/s^2)
Q : debit aliran air (m^3/s)
H : *head* efektif (m)

Dalam kondisi nyata, daya keluaran sistem dipengaruhi oleh efisiensi turbin, generator, serta rugi-rugi mekanik dan hidrolik pada sistem transmisi. Oleh karena itu, desain turbin dan karakteristik aliran sangat menentukan performa pembangkit listrik tenaga *micro hydro*.

2.1.1 Turbin Kaplan *Fixed Pitch*

Turbin Kaplan merupakan turbin reaksi aliran aksial yang dirancang untuk bekerja optimal pada kondisi *head* rendah dan debit besar. Turbin ini memiliki runner berbentuk baling-baling dengan arah aliran air sejajar terhadap poros turbin. Pada tipe *fixed pitch*, sudut sudu runner dibuat tetap sehingga konstruksi menjadi lebih sederhana dan mudah dalam proses fabrikasi maupun perawatan.[5]

Turbin Kaplan memiliki beberapa keunggulan seperti efisiensi tinggi pada kondisi *head* rendah, putaran yang stabil, serta kemampuan bekerja pada debit besar.[6] Oleh karena itu, turbin Kaplan tipe *fixed pitch* sangat sesuai diterapkan pada sistem *micro hydro* skala kecil di wilayah terpencil maupun pos perbatasan yang membutuhkan sumber energi alternatif dengan konstruksi sederhana namun tetap memiliki performa yang baik.

Dalam penelitian ini, turbin Kaplan *fixed pitch* digunakan sebagai sumber penggerak generator untuk menghasilkan daya listrik sekitar ±100 Watt. Pemilihan turbin dilakukan berdasarkan karakteristik lokasi penelitian yang memiliki debit air relatif besar dengan *head* rendah sehingga sesuai dengan karakteristik kerja turbin Kaplan.

2.1.2. Analisis *Computational Fluid Dynamics*

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode simulasi numerik yang digunakan untuk menganalisis karakteristik aliran fluida pada suatu sistem. Simulasi CFD digunakan untuk mengetahui distribusi tekanan, distribusi kecepatan, pola aliran fluida, serta pembentukan torsi pada runner turbin.[7]

Hasil simulasi CFD dijadikan sebagai dasar evaluasi performa hidrolik turbin guna menentukan desain runner yang paling optimal dalam menghasilkan putaran dan daya mekanik pada kondisi debit tertentu.

2.1.3. Analisis *Finite Element Analysis*

Finite Element Analysis (FEA) merupakan metode analisis numerik yang digunakan untuk mengetahui kemampuan struktur dalam menerima pembebanan. Analisis FEA dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan *Von Mises*, deformasi total, dan nilai *safety factor* pada runner turbin.[8]

Hasil analisis struktur digunakan untuk mengetahui tingkat keamanan desain runner sehingga risiko kegagalan struktur akibat tegangan berlebih dapat diminimalkan.

2.2 Hipotesis

Hipotesis dalam penelitian ini adalah turbin *micro hydro* tipe Kaplan *fixed pitch* mampu menghasilkan daya listrik sekitar ±100 Watt pada kondisi *head* rendah dengan konstruksi runner yang aman berdasarkan hasil analisis CFD dan FEA

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode rekayasa (engineering research) yang meliputi tahapan perancangan, simulasi numerik, pembuatan prototipe, dan pengujian eksperimen untuk

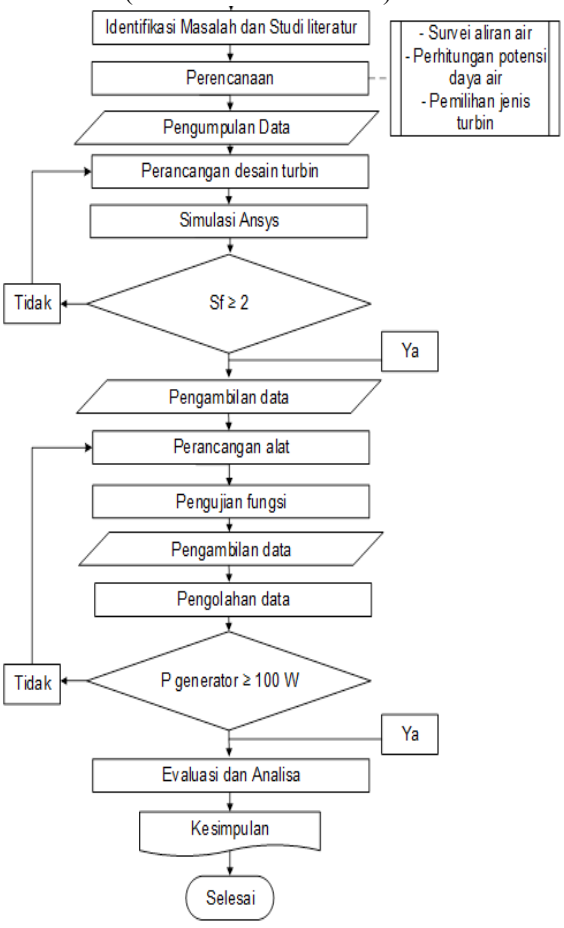
mengevaluasi kinerja turbin mikrohidro tipe Kaplan fixed pitch dengan target daya ±100 Watt pada kondisi head rendah.

Penelitian dilaksanakan di Sungai Brantas, Kota Batu. Tahap awal dilakukan pengukuran debit dan head menggunakan metode volumetrik dan water level. Selanjutnya dilakukan perancangan turbin dengan parameter utama meliputi diameter runner, jumlah sudu, sudut sudu, serta sistem transmisi.

Validasi desain dilakukan melalui simulasi CFD untuk analisis aliran dan torsi, serta FEA untuk analisis kekuatan struktur. Setelah itu dilakukan pembuatan prototipe dan pengujian eksperimen dengan mengukur RPM, tegangan, arus, dan daya listrik. Data hasil penelitian kemudian dianalisis dengan membandingkan hasil teoritis, simulasi, dan eksperimen untuk mengevaluasi kinerja sistem.[9]

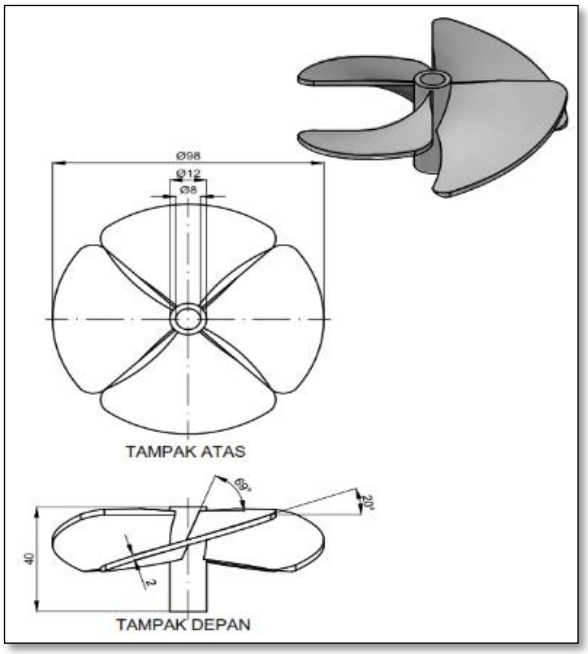
3.1. Diagram Alir

Gambar 3 Diagram Alir Penelitian
(Sumber Diolah Peneliti)

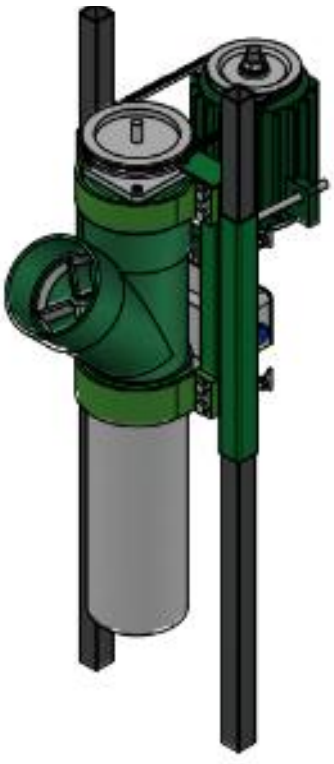


4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi potensi sumber air melalui pengukuran debit dan head. Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh debit aliran sebesar 0,01745 m^3/s dan head efektif sebesar 1,84 m. Dari parameter



Gambar 1 Desain Runner
Sumber Diolah Peneliti



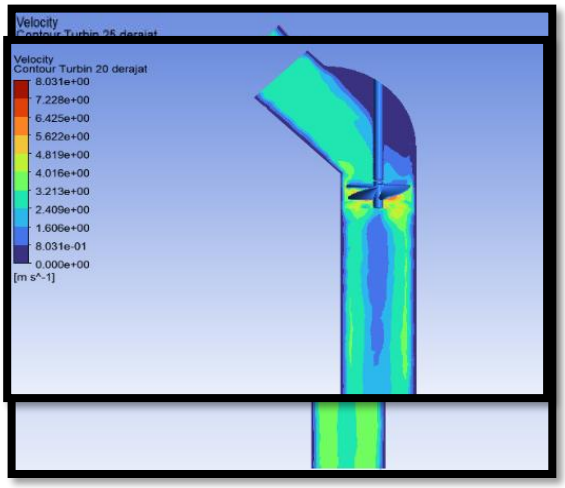
Gambar 2 Desan Alat
Sumber Diolah Peneliti,2026

tersebut dihitung daya hidrolik teoritis sebesar 314,98 Watt. Analisis menggunakan hukum Bernoulli menunjukkan bahwa penyempitan diameter pipa dari 6 inch ke 4 inch meningkatkan kecepatan aliran dari 0,96 m/s menjadi 2,15 m/s. Peningkatan kecepatan ini menyebabkan energi kinetik fluida meningkat secara signifikan. Energi

kinetik yang lebih besar dimanfaatkan untuk menggerakkan runner turbin. Dengan demikian, kondisi aliran yang dirancang mampu mendukung kinerja turbin mikrohidro. Hasil ini menunjukkan bahwa sumber air yang digunakan memiliki potensi yang cukup untuk mencapai target daya ±100 Watt.

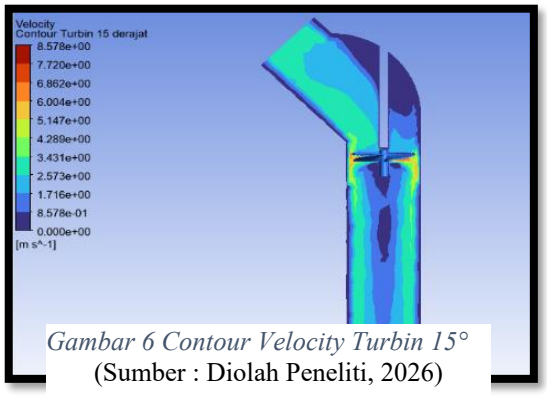
Hasil perancangan turbin menunjukkan bahwa diameter runner sebesar 98 mm dengan jumlah sudu sebanyak 4 buah. Variasi sudut sudu yang digunakan adalah 25°, 20°, dan 15°. Perhitungan teoritis menunjukkan daya mekanik turbin sebesar 220,49 Watt dengan torsi sebesar 2,11 N·m pada putaran 1000 rpm. Perancangan poros menghasilkan diameter minimum sebesar 6,38 mm, namun digunakan diameter aktual 12 mm untuk meningkatkan keamanan struktur. Hasil analisis menunjukkan bahwa poros berada dalam kondisi aman dengan faktor keamanan tinggi. Dengan demikian, desain turbin dinyatakan layak untuk tahap simulasi dan pengujian. Perancangan ini menjadi dasar dalam mengevaluasi performa sistem secara keseluruhan.

1. Turbin 1 (25)



Gambar 5 Contour Velocity Turbin 25°
(Sumber : Diolah Peneliti, 2026)

2. Turbin 2 (20)
3. Turbin 3 (15)



Gambar 6 Contour Velocity Turbin 15°
(Sumber : Diolah Peneliti, 2026)

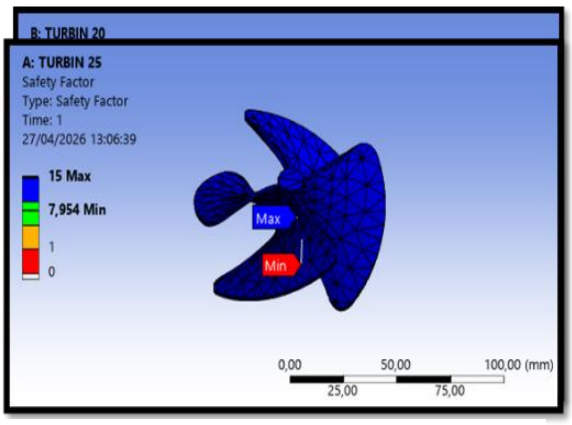
Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa variasi sudut sudu runner berpengaruh terhadap distribusi tekanan, kecepatan aliran, pola aliran fluida, dan pembentukan torsi pada turbin micro hydro. Perbedaan sudut sudu menyebabkan perubahan arah aliran fluida yang mengenai permukaan runner sehingga memengaruhi gaya tangensial yang terbentuk pada sudu turbin. Kondisi ini berdampak langsung terhadap kemampuan turbin dalam mengkonversi energi hidrolik menjadi energi mekanik pada poros.

Pada sudut sudu 25°, aliran fluida cenderung lebih stabil, namun pembentukan torsi belum optimal karena sebagian energi aliran menyebar

Gambar 4 Contour Velocity Turbin 20°
(Sumber : Diolah Peneliti, 2026)

pada permukaan sudu. Sebaliknya, sudut sudu 15° menghasilkan kecepatan aliran lebih tinggi, tetapi disertai turbulensi dan wake flow yang menyebabkan sebagian energi fluida hilang. Sementara itu, sudut sudu 20° menunjukkan keseimbangan terbaik antara kestabilan aliran dan kecepatan fluida sehingga menghasilkan distribusi tekanan yang lebih optimal dan torsi tertinggi sebesar 1,1625 N·m. Dengan demikian, sudut sudu 20° dinyatakan sebagai konfigurasi runner paling optimum pada penelitian ini.

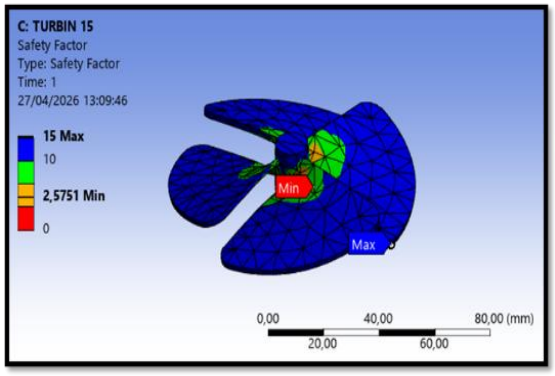
1. Turbin 1 (25)



Gambar 7 Safety Factor Turbin 25°
(Sumber : Diolah Peneliti, 2026)

2. Turbin 2 (20)

3. Turbin 3 (15°)



Gambar 9 Safety Factor Turbin 15°
(Sumber : Diolah Peneliti, 2026)

Hasil simulasi FEA menunjukkan bahwa seluruh variasi sudut berada dalam kondisi aman dengan faktor keamanan lebih dari 2. Sudut 25° memiliki tegangan terendah dan faktor keamanan tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa secara struktur, turbin aman untuk dioperasikan. Hasil simulasi memberikan gambaran awal performa turbin sebelum diuji secara nyata.

Hasil Pengujian eksperimen dilakukan untuk mengetahui kemampuan konstruksi turbin micro hydro dalam menggerakkan generator dan menghasilkan energi listrik pada berbagai kondisi pengujian. Pengambilan data dilakukan melalui pengujian tanpa beban dan berbeban dengan variasi sistem transmisi pulley antara turbin dan generator. Parameter yang diamati meliputi putaran turbin (RPM), putaran generator, tegangan, arus, daya listrik, torsi, dan daya mekanik turbin.

4.1 Pengujian Tanpa Beban

Pengujian tanpa beban dilakukan untuk mengetahui karakteristik awal sistem turbin dalam menggerakkan generator tanpa adanya konsumsi daya listrik eksternal. Berdasarkan hasil pengujian, peningkatan putaran turbin berpengaruh terhadap peningkatan putaran generator sehingga tegangan keluaran generator juga mengalami kenaikan.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi putaran yang dihasilkan turbin maka semakin besar gaya gerak listrik yang dibangkitkan oleh generator. Variasi rasio pulley memengaruhi kecepatan putaran generator, dimana rasio tertentu menghasilkan putaran generator lebih tinggi sehingga tegangan keluaran yang dihasilkan juga meningkat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem turbin mampu bekerja secara stabil tanpa terjadi gangguan mekanis maupun ketidakstabilan putaran selama pengoperasian.

4.2 Pengujian Berbeban

Pengujian berbeban dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem turbin micro hydro dalam menghasilkan daya listrik ketika diberikan pembebanan pada generator. Parameter pengujian meliputi massa beban pengereman, torsi, RPM turbin, RPM generator, tegangan, arus, daya listrik, dan daya mekanik.

Tabel 4.1 Hasil Uji Berbeban Turbin Micro Hydro

No	Variasi Turbin	RPM Generator (rpm)	Daya Mekanik (W)	Daya Listrik (W)
1	Turbin 1 (25°)	1055,4	461,80	97,20
2	Turbin 2 (20°)	1124,2	472,78	127,71
3	Turbin 3 (15°)	1025,8	406,81	99,36

Berdasarkan hasil eksperimen, peningkatan RPM turbin menyebabkan kenaikan putaran generator yang berdampak pada meningkatnya tegangan dan daya listrik keluaran. Namun demikian, adanya pembebanan menyebabkan penurunan putaran relatif dibandingkan kondisi tanpa beban akibat meningkatnya hambatan pada sistem generator.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi rasio pulley memberikan pengaruh terhadap performa sistem. Variasi pulley tertentu menghasilkan keseimbangan terbaik antara torsi dan putaran generator sehingga mampu menghasilkan daya listrik lebih tinggi dibanding variasi lainnya. Selain itu, turbin tetap mampu mempertahankan kestabilan operasi selama proses pengujian tanpa mengalami getaran berlebihan, deformasi, maupun kegagalan mekanis pada runner.

Secara keseluruhan, hasil eksperimen menunjukkan bahwa konstruksi turbin micro hydro yang dirancang mampu menggerakkan generator dan menghasilkan daya listrik mendekati target penelitian sekitar ±100 W. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki potensi untuk diterapkan sebagai supply energi alternatif pada pos perbatasan personel TNI AD.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem pembangkit listrik berbasis mikrohidro dengan turbin Kaplan fixed pitch berhasil dirancang dan diimplementasikan sesuai dengan tujuan penelitian. Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh debit aliran sebesar 0,01745 m^3/s dan head efektif sebesar 1,84 m yang menghasilkan daya hidrolik teoritis sebesar 314,98 Watt. Hasil ini menunjukkan bahwa sumber air yang digunakan memiliki potensi yang cukup untuk mendukung pembangkitan energi listrik skala kecil.

Hasil simulasi numerik menggunakan CFD menunjukkan bahwa variasi sudut sudu memberikan pengaruh signifikan terhadap distribusi aliran dan nilai torsi yang dihasilkan. Sudut sudu 20°

menghasilkan torsi terbesar sebesar 1,1625 N·m, yang menunjukkan interaksi fluida paling efektif. Sementara itu, hasil simulasi FEA menunjukkan bahwa seluruh variasi desain berada dalam kondisi aman dengan faktor keamanan di atas 2, sehingga layak untuk dioperasikan.

Hasil pengujian eksperimen menunjukkan bahwa daya listrik maksimum sebesar 109,82 Watt diperoleh pada sudut sudu 20°, dengan efisiensi sistem sebesar 34,86%. Nilai ini menunjukkan adanya rugi-rugi energi dalam sistem, namun masih dalam batas yang wajar untuk sistem mikrohidro skala kecil. Berdasarkan perbandingan antara hasil teoritis, simulasi, dan eksperimen, dapat disimpulkan bahwa sudut sudu 20° merupakan kondisi optimum karena menghasilkan performa terbaik secara keseluruhan.

Dengan demikian, sistem turbin mikrohidro yang dirancang telah mampu mencapai target daya ±100 Watt dan berpotensi untuk digunakan sebagai solusi energi alternatif pada wilayah perbatasan atau daerah terpencil. *micro hydro* Kaplan *fixed pitch* yang dirancang mampu bekerja pada kondisi *head* rendah sebesar 1,84 meter dan menghasilkan daya listrik lebih dari 100 Watt. Variasi *runner* dengan sudut sudu 20° menghasilkan performa terbaik berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan simulasi numerik. Hasil analisis FEA menunjukkan seluruh *runner* memiliki nilai *safety factor* lebih besar dari 2 sehingga aman digunakan secara kontinu.

Penelitian selanjutnya disarankan melakukan optimasi desain sudu dan sistem transmisi guna meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan serta mengurangi rugi-rugi energi pada sistem *micro hydro*.

DAFTAR PUSTAKA

[1] T. dan K. E. K. E. dan S. D. M. Direktorat Jenderal Energi Baru, "Buku Rencana Strategis (Renstra) Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (Ditjen EBTKE) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Tahun 2020-2024," 2020.

[2] R. V. C. Ramalho *et al.*, "Design of Low-Cost Axial-Flow Turbines for Very Low-Head Micro-Hydropower Plants," *Processes*, vol. 13, no. 6, Jun. 2025, doi: 10.3390/pr13061865.

[3] F. M. Tamiri, M. A. Ismail, and W. K. Muzammil, "Low head micro hydro systems for rural electrification," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/834/1/012041.

[4] J. O. Oladigbolu, M. A. M. Ramli, and Y. A. Al-Turki, "Optimal design of a hybrid pv solar/micro-hydro/diesel/battery energy system for a remote rural village under tropical climate conditions," *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 9, pp. 1–22, Sep. 2020, doi: 10.3390/electronics9091491.

[5] Q. Yan *et al.*, "Computational Fluid Dynamics Analysis of Draft Tube Flow Characteristics in a Kaplan Turbine," *Actuators*, vol. 14, no. 6, Jun. 2025, doi: 10.3390/act14060298.

[6] C. Abeykoon, "Modelling and optimisation of a Kaplan turbine — A comprehensive theoretical and CFD study," *Cleaner Energy Systems*, vol. 3, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cles.2022.100017.

[7] M. I. Miskat *et al.*, "An overview of the hydropower production potential in Bangladesh to meet the energy requirements," Dec. 01, 2021, *Korean Society of Environmental Engineers*. doi: 10.4491/eer.2020.514.

[8] D. Barsi, R. Fink, P. Odry, M. Ubaldi, and P. Zunino, "Flow Regulation of Low Head Hydraulic Propeller Turbines by Means of Variable Rotational Speed: Aerodynamic Motivations," *Machines*, vol. 11, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/machines11020202.