

Analisis Dinamika Fluida Terhadap Kinerja Turbin *Cross-flow* Akibat Perubahan Profil Sudu dan Debit Air pada *Head* Rendah

Mafruddin^{1*}, Sulis Dri Handono², Dwi Irawan³, Adi Cahyono⁴,

⁴Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Metro
^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Metro
Jl. Ki Hajar Dewantara 15 A Kota Metro, Lampung, Indonesia
*Corresponding author: mafruddinmn@gmail.com

Abstract

Optimal performance in various working conditions makes the Cross-flow turbine the best impulse turbine choice based on rotation, torque and turbine power. The flow dynamics inside the turbine are related to the turbine performance, where the blade profile has an important role in the utilization of fluid momentum, flow distribution and extraction of water energy into mechanical energy of the turbine. This study aims to analyze the differences in blade profiles and water discharge on the flow characteristics inside the turbine and their impact on turbine performance. Experimental research was conducted with turbine specifications, namely the inner diameter of the runner 100 mm, outer diameter of the runner 150 mm, nozzle thickness 30 mm, number of blades 18 and runner blade radius 24.4 mm. Turbine testing was carried out with a variety of blade profiles and water discharge at a low head of 0.82 m. The results of the study concluded that the blade profile and water discharge have a significant impact on the flow characteristics and performance of the Cross-flow turbine. The optimal blade profile produces a uniformly distributed flow, effective energy extraction, thereby improving turbine performance. The greater water discharge increases the volume and velocity of water, thereby maximizing momentum and improving turbine performance. The best turbine performance was obtained with blade profile A at a water discharge of 120 LPM.

Keywords: *Blade profile, Water discharge, flow characteristics, Cross-flow turbine performance.*

Abstrak

Kinerja yang optimal dalam berbagai kondisi kerja menjadikan turbin *Cross-flow* sebagai pilihan turbin impuls terbaik berdasarkan putaran, torsi dan daya turbin. Dimanika aliran didalam turbin berkaitan dengan kinerja turbin, dinamika profil sudu memiliki peran penting dalam pemanfaatan momentum fluida, distribusi aliran dan ekstraksi energi air menjadi energi mekanik turbin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbedaan profil sudu dan debit air terhadap karakter aliran didalam turbin dan dampaknya terhadap kinerja turbin. Penelitian eksperimental dilakukan dengan spesifikasi turbin yaitu diameter dalam runner 100 mm, diameter luar runner 150 mm, tebal nosel 30 mm, jumlah sudu 18 dan jari-jari sudu runner 24.4 mm. Pengujian turbin dilakukan dengan variasi profil sudu dan debit air pada *head* rendah yaitu 0.82 m. Hasil penelitian disimpulkan bahwa profil sudu dan debit air memiliki dampak yang signifikan terhadap karakter aliran dan kinerja turbin *Cross-flow*. Profil sudu yang optimal menghasilkan aliran yang terdistribusi seragam, ekstraksi energi yang efektif sehingga meningkatkan kinerja turbin. Debit air yang semakin besar meningkatkan volume dan kecepatan air sehingga memaksimalkan momentum dan meningkatkan kinerja turbin. Kinerja turbin terbaik diperoleh dengan sudu profil A pada debit air 120 LPM.

Kata kunci: Profil sudu, Debit air, Karakter aliran, kinerja turbin *Cross-flow*.

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan setiap tahunnya. Atas dasar pertimbangan tersebut pemerintah Indonesia melalui kementerian ESDM menargetkan peningkatan kapasitas pembangkit listrik pada tahun 2034 mencapai 69.5 GW, dimana 76 persen bersumber dari energi baru terbarukan (EBT) diantaranya energi air mencapai 11.7 GW [1].

Provinsi Lampung merupakan salah satu daerah yang menjadi prioritas pengembangan pembangkit listrik tenaga air berdasarkan RUPTL 2019-2028 [2]. Kapasitas pembangkit listrik yang terpasang sekitar 9 persen dari total kapasitas seluruh Indonesia yaitu 75000 MW [3]. Untuk mendukung pemanfaatan energi air sebagai pembangkit listrik diperlukan mesin konversi energi yaitu turbin air *Cross-flow*. Turbin jenis impuls ini dipilih karena konstruksinya yang sederhana tetapi menghasilkan daya yang optimal diberbagai kondisi kerja.

Penelitian mengenai turbin *Cross-flow* telah dilakukan dimulai dari fabrikasi dan pemanfaatannya untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro [4]. Kemudian dilanjutkan dengan memvariasikan sudut sudu dan nosel sehingga meningkatkan efisiensi turbin [5]. Peningkatan kinerja turbin juga dapat dilakukan dengan memvariasikan bukaan bagian pengarah (*guide vane*) [6]. Selain itu, perbandingan diameter dalam dan diameter luar serta jumlah sudu *runner* juga berpengaruh terhadap kinerja turbin *Cross-flow* [7]. Sudu pada *runner* turbin *Cross-flow* memiliki peran mengkonversi energi air menjadi keluaran energi mekanik dalam bentuk putaran turbin, sehingga jari-jari sudu dapat mempengaruhi kinerja turbin *Cross-flow* [8].

Penelitian lainnya terkait jumlah sudu turbin, rasio diameter dan sudut nosel terhadap kinerja turbin *Cross-flow* [9][10]. Penerapan turbin pada *head* yang berbeda juga berpengaruh pada kinerja turbin [11]. Penelitian secara numerik menunjukkan bahwa profil nosel, sudut inlet *runner*, sudut sudu dan jumlah sudu mempengaruhi kinerja turbin [12][13].

Penelitian secara simulasi untuk mengoptimalkan kinerja turbin dengan

beberapa parameter seperti bentuk nosel, sudut *guide vane*, jumlah sudu, rasio diameter, profil nosel, sudut nosel, profil sudu, lebar nosel [14][15] [16]. Penelitian secara eksperimen sudut nosel pada variasi debit air terhadap kinerja turbin *Cross-flow* pada tingkat pertama [17].

Penelitian eksperimen dengan bentuk profil sudu berpenampang L pada turbin *Cross-flow* dengan jumlah sudu yang berbeda terhadap kinerja turbin [18] [19]. Karakteristik turbin *Cross-flow* pada kapasitas daya 5 kW [20].

Penelitian dengan metode simulasi mengenai ekstraksi energi yang dipengaruhi oleh faktor penyumbatan aliran air yang disebabkan oleh turbin [21]. Penelitian terkait pengaruh laju aliran terhadap medan aliran dan kinerja turbin *Cross-flow undershot* [22]. Geometri *runner* terhadap kinerja turbin *Cross-flow* dan beberapa parameter geometri *runner* yang optimal [23].

Penelitian simulasi tentang geometri *guide* nosel dan nosel bagian depan terhadap kinerja turbin [24]. Parameter desain dan variasi profil sudu terhadap kinerja turbin *Cross-flow* [25]. Beberapa parameter tak berdimensi, termasuk bilangan *Reynolds*, rasio penyumbatan, dan bilangan *Froude*, memiliki pengaruh signifikan terhadap performa turbin *Cross-flow* [26]. Penelitian simulasi tentang bagaimana perbedaan bentuk profil sudu (tidak seragam, tipis, dan standar) memengaruhi efisiensi turbin *Cross-flow* [27]. Penelitian secara simulasi (numerik) tentang profil sudu menunjukkan bahwa profil sudu yang optimal mampu meningkatkan kinerja turbin [28][29][30][31]. Penelitian secara simulasi menunjukkan bahwa rasio lebar *runner* dan diameter turbin *Cross-flow* 0.56 merupakan titik maksimum [32].

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar debit air yang digunakan kinerja turbin semakin meningkat [33]. Kesesuaian busur masuk nosel memengaruhi sudut serang sehingga dapat meningkatkan efisiensi turbin sebesar 9.3%, dan optimalisasi desain nosel yang lebih sempit meningkatkan momentum sehingga efisiensi turbin meningkat sebesar 35.6% [34].

Berbagai penelitian sebelumnya berfokus pada aspek variasi jumlah sudu,

rasio diameter, sudut nosel dan bentuk *guide vane* terhadap kinerja turbin baik secara numerik maupun eksperimental. Namun, penelitian komprehensif yang menganalisis pengaruh bentuk dan profil sudu terhadap karakter aliran fluida didalam *runner* dan kinerja turbin secara bersamaan dengan variasi debit air pada *head* rendah masih sangat terbatas.

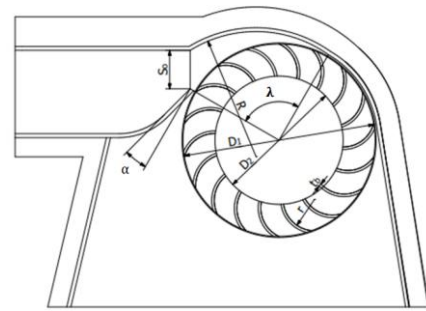
Penelitian ini menyajikan pendekatan eksperimental terintegrasi yang berfokus pada analisis pengaruh profil sudu dengan bagian ujung yang tipis, oval dan standar terhadap karakter aliran didalam turbin (meliputi momentum fluida, distribusi aliran dan pola aliran serta kehilangan energi) dan parameter kinerja nyata turbin *Cross-flow* (meliputi putaran, torsi dan daya turbin) yang di aplikasikan di berbagai variasi debit air pada *head* rendah.

Tujuan penelitian untuk mengidentifikasi profil sudu yang paling efisien dalam mengonversi energi kinetik air menjadi daya mekanik turbin pada kondisi debit air yang bervariasi. Memberikan dasar empiris untuk optimalisasi desain sudu turbin *Cross-flow* yang lebih adaptif terhadap kondisi aliran yang bervariasi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman teoritis tentang fenomena aliran fluida didalam turbin *Cross-flow*, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap peningkatan efisiensi konversi energi air menjadi energi listrik terbarukan khususnya pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA).

2. Metode Penelitian

Penelitian diawali dengan perencanaan desain turbin dan fabrikasi turbin *Cross-flow*, dilanjutkan dengan pengujian kinerja (performa) dari turbin tersebut. Pembuatan turbin dilakukan berdasarkan dimensi yang diperoleh dari hasil rancangan (desain), serta mencakup beberapa variasi desain profil sudu yang telah ditentukan sebelumnya. Proses pengujian kinerja turbin dilakukan dengan mengoperasikan sistem turbin dan kelengkapan alat uji lainnya menggunakan metode pengereman berbasis dynamometer.

Spesifikasi turbin *Cross-flow* dijelaskan pada Gambar 1.



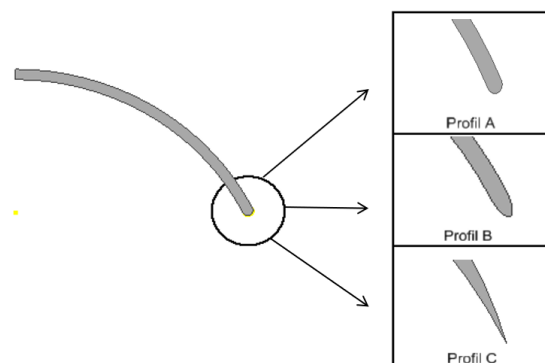
Gambar 1. Desain turbin *Cross-flow*

Table 1. Nilai parameter geometri turbin *Cross-flow*

Variabel	Nilai
Diameter luar (D_1)	150 mm
Diameter dalam (D_2)	100 mm
Nozzle Entry Arc (λ)	90°
Nozzle Throat Width (S_o)	30 mm
Angle of attack (α)	15°
Rear-wall nozzle (R)	97.5 mm
Radius sudu (r)	24.4 mm
Jumlah sudu (nb)	18
Tebal sudu (tb)	2 mm
Diameter poros	10 mm

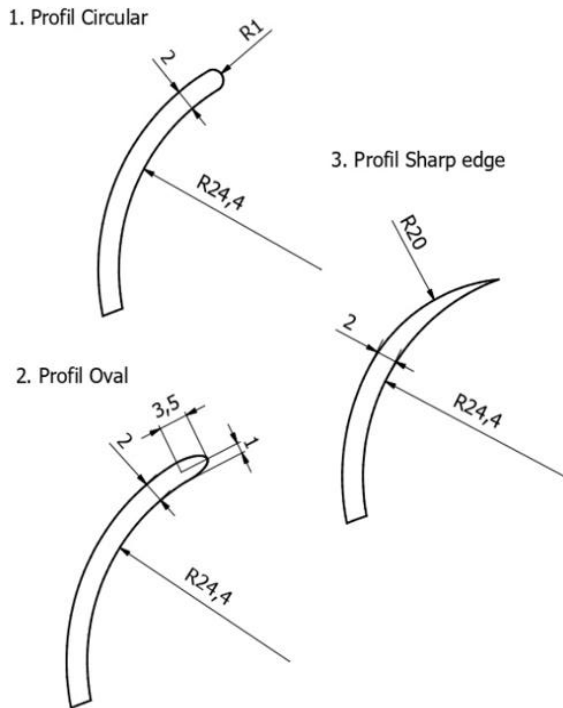
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan dua variabel bebas utama yakni profil sudu dan debit air (60 LPM, 80 LPM, 100 LPM, dan 120 LPM). Penelitian ini menggunakan kinerja turbin sebagai variabel terikat, yang diukur berdasarkan nilai putaran, torsi dan daya turbin *Cross-flow*. Variabel terkontrol ditetapkan pada *head* efektif sebesar 0.82 m selama pengujian.

Variasi profil sudu *runner* turbin *Cross-flow* dijelaskan pada Gambar 2.



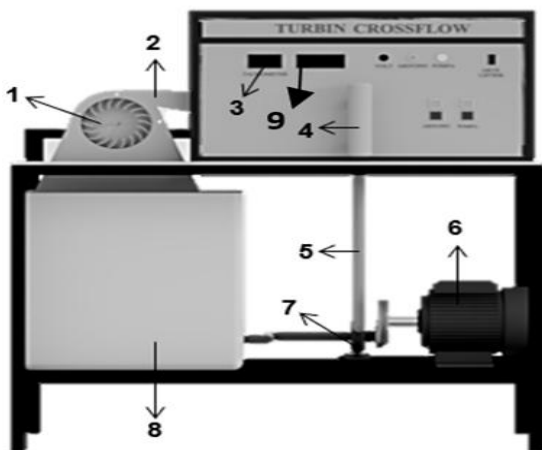
Gambar 2. Variasi profil sudu *runner* turbin

Variasi Profil sudu yang digunakan meliputi profil A (*Circular*), profil B (*Oval*), Profil C (*sharp edge*) dengan spesifikasi seperti dijelaskan pada Gambar 3 (*satuan mm*).



Gambar 3. Spesifikasi profil sudu

Skema penelitian dijelaskan seperti Gambar 4.



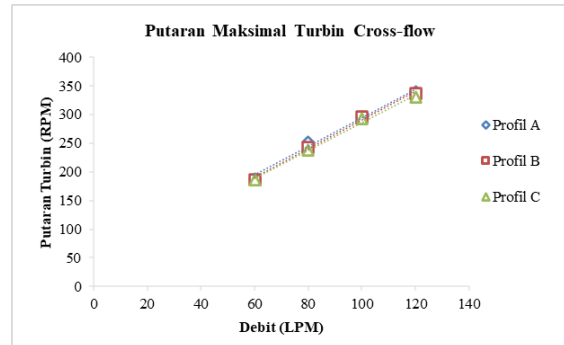
Gambar 4. Skema penelitian

Keterangan:

- | | |
|-------------------------|--------------------|
| 1. <i>Runner</i> turbin | 5. Saluran pipa |
| 2. Nosel turbin | 6. Motor penggerak |
| 3. Tachometer | 7. Pompa |
| 4. Flowmeter | 8. Bak penampung |
| | 9. Forcemeter |

3. Hasil dan Pembahasan

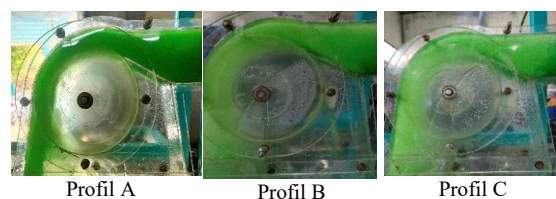
Hasil pengujian putaran maksimal turbin seperti yang ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Putaran maksimal turbin

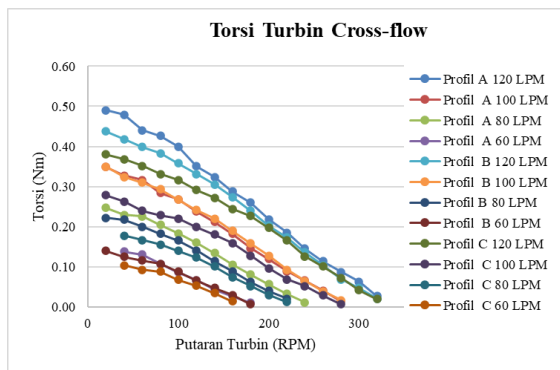
Gambar 5. menunjukkan bahwa profil sudu dan debit air berpengaruh terhadap putaran maksimal turbin. Putaran maksimal merupakan putaran tanpa beban dimana proses pengereman belum dilakukan pada dynamometer. Putaran tertinggi diperoleh dengan profil A yaitu 340 rpm pada debit air 120 LPM. Hasil ini menunjukkan bahwa kecepatan putaran maksimal turbin meningkat pada masing-masing profil sudu seiring bertambahnya debit air. Peningkatan debit air berpengaruh terhadap peningkatan kecepatan aliran sehingga memperbesar momentum dan energi kinetik yang diteruskan ke sudu. Hasil ini selaras dengan penelitian sebelumnya [35]. Gambar 5. menunjukkan bahwa terdapat perbedaan putaran maksimal turbin pada profil sudu yang berbeda, hal ini menunjukkan bahwa profil sudu memiliki peran penting dalam peningkatan putaran turbin [36].

Pada putaran maksimal dengan debit air 120 LPM masing-masing profil sudu menghasilkan karakter aliran yang berbeda seperti Gambar 6.



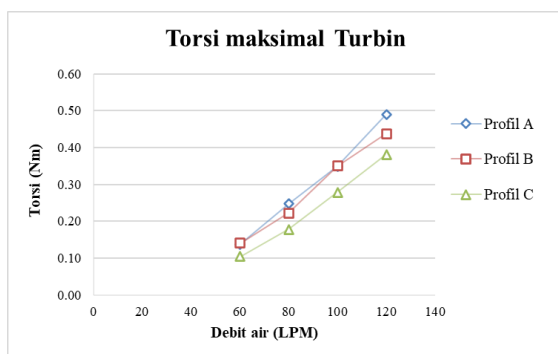
Gambar 6. Karakter aliran pada putaran maksimal

Pada profil A karakter aliran air cenderung lebih merata (laminer) dan lebih sedikit terjadinya turbulensi, faktor ini yang menyebabkan pemanfaatan energi air lebih maksimal. Sedangkan pada profil B dan profil C aliran air cenderung tidak merata dan turbulen serta terjadi perpisahan aliran sehingga menyebabkan hilangnya energi air pada bagian tepi sudu [36].



Gambar 7. Torsi turbin

Grafik 7. menunjukkan bahwa torsi menurun seiring meningkatnya putaran turbin pada semua variasi profil sudu dan debit air. Penurunan torsi turbin terjadi karena berkurangnya gaya dorong fluida yang disebabkan oleh penurunan pemanfaatan momentum air pada sudu saat kecepatan rotasi meningkat, sehingga gaya efektif yang berperan menghasilkan torsi menjadi lebih kecil. Pola yang dihasilkan selaras dengan penelitian sebelumnya [22] [17].

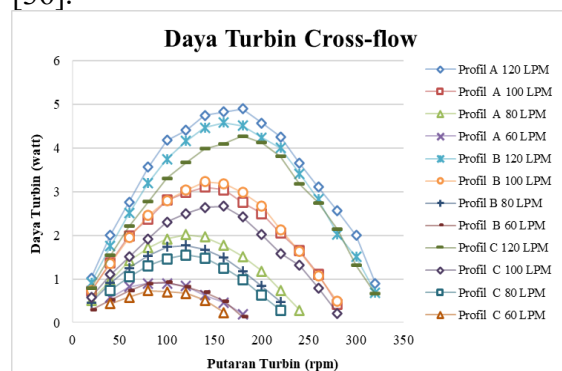


Gambar 8. Torsi maksimal

Profil sudu dan debit air merupakan faktor utama yang memengaruhi besarnya torsi turbin *Cross-flow*. Gambar 8. menunjukkan bahwa desain sudu profil A pada debit 120 LPM menghasilkan torsi tertinggi yaitu 0.49 Nm, sedangkan profil B

dan C torsi yang dihasilkan turbin lebih rendah. Dengan berkurangnya debit dari 100, 80, hingga 60 LPM, torsi yang dihasilkan turbin juga menurun secara signifikan, hal ini menunjukkan bahwa peningkatan debit air berbanding lurus dengan peningkatan torsi yang dihasilkan turbin. Peningkatan debit air menyebabkan volume air meningkat sehingga berdampak pada peningkatan kecepatan dan energi kinetik air yang menumbuk sudu, hal ini yang menyebabkan gaya tangensial yang bekerja pada poros turbin meningkat.

Profil sudu memberikan pengaruh yang signifikan terhadap torsi yang dihasilkan, dengan profil sudu yang optimal mampu memanfaatkan momentum fluida (air) secara efektif sehingga menghasilkan torsi yang lebih tinggi. Profil sudu memengaruhi arah serta distribusi momentum fluida saat menumbuk sudu. Profil A merupakan bentuk yang lebih optimal dalam mengarahkan aliran air ke permukaan sudu sehingga menghasilkan gaya tangensial lebih besar dan kehilangan energi turbulensi yang lebih rendah. Sebaliknya, sudu dengan profil B dan C menghasilkan torsi cenderung lebih rendah, hal ini mengindikasikan bahwa desain sudu kurang efisien dalam memanfaatkan momentum dan energi kinetik fluida. Pola aliran yang terjadi pada profil ini menimbulkan separasi aliran (turbulensi) sehingga konversi energi tidak maksimal [36].

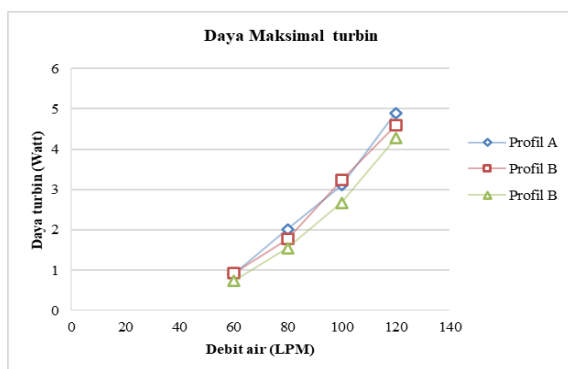


Gambar 9. Daya turbin

Gambar 9. menunjukkan daya yang dihasilkan oleh turbin pada setiap putaran dengan variasi profil sudu dan debit air.

Daya maksimum turbin 4.9 watt didapatkan pada kecepatan putaran sedang yaitu pada kisaran 150 sampai 200 rpm, semakin tinggi putaran daya turbin menurun. Hasil penelitian selaras dengan beberapa penelitian sebelumnya [9][13][16] [21] [23] [25] [37] [38].

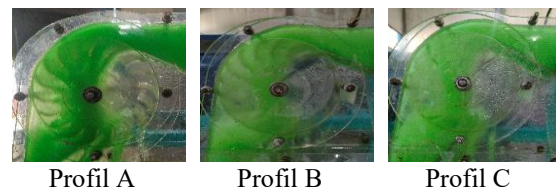
Torsi dan kecepatan putaran *runner* berperan penting terhadap daya yang dihasilkan turbin. Dalam kondisi putaran maksimal turbin, tidak terjadi aliran silang (pemanfaatan energi air hanya satu tahap) pada *runner* turbin dan hanya beberapa sudu yang menerima energi kinetik air. Selain itu, momentum yang dihasilkan dari perubahan kecepatan air yang masuk dan keluar *runner* turbin cenderung lebih rendah sehingga berdampak pada torsi yang dihasilkan turbin. Penambahan beban pengereman dynamometer pada saat pengujian menyebabkan putaran turbin menurun, sehingga menyebabkan aliran menjadi lebih seragam (laminar) dan pemanfaatan energi kinetik air terjadi pada dua tahap (aliran tahap pertama dan tahap kedua). Kondisi ini berdampak pada peningkatan jumlah sudu yang menerima energi kinetik air sehingga memaksimalkan pemanfaatan energi air dan meningkatkan daya turbin pada putaran tertentu. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya [39]. Peningkatan torsi turbin pada saat pengujian dipengaruhi oleh beban pengereman pada dynamometer, hal ini berdampak pada penurunan putaran turbin sehingga terjadi kerugian hidrolis yang disebabkan oleh akumulasi aliran air di dalam *runner* dan menyebabkan penurunan daya turbin.



Gambar 10. Daya maksimal

Gambar 10. Menunjukkan pengaruh variasi profil sudu dan debit air terhadap daya maksimal turbin. Daya turbin menurun seiring dengan penurunan debit air yang digunakan. Penurunan debit air akan berdampak pada distribusi aliran yang tidak merata pada turbin dan menyebabkan penurunan daya turbin [25]. Semakin besar debit air yang digunakan berdampak terhadap peningkatan daya turbin dan begitu pula sebaliknya. Desain dimensi turbin mempertimbangkan debit aliran dan tinggi muka air (*head*) sebagai parameter utama, sehingga kesesuaian antara kondisi operasi aktual turbin dan rancangan desain menjadi faktor penting dalam mengoptimalkan kinerja turbin [34].

Karakter aliran air pada debit 120 LPM dengan desain sudu profil A pada torsi maksimal dijelaskan seperti gambar berikut.



Gambar 11. Karakter aliran pada torsi maksimal

Gambar 11. menunjukkan bahwa terdapat perbedaan karakteristik aliran didalam turbin. Profil A menghasilkan aliran yang lebih seragam (laminar) sedangkan profil B dan C menghasilkan aliran yang lebih acak (turbulen). Pola aliran yang lebih seragam akan mengurangi kerugian gesek (*head loss*) antara air dengan *runner* turbin. Distribusi aliran dan profil kecepatan berpengaruh terhadap kinerja turbin [7]. Aliran yang seragam menggambarkan bahwa *head* air dikonversi menjadi energi kinetik secara maksimal sehingga ekstraksi energi ke turbin juga meningkat. Hal ini yang menyebabkan profil A mampu menghasilkan kinerja turbin yang maksimal.

Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa profil sudu yang optimal mampu meningkatkan kinerja turbin. Hasil pengamatan karakter aliran pada profil sudu dan debit air yang berbeda menghasilkan pemahaman baru tentang faktor-faktor

utama yang memengaruhi performa turbin, sekaligus memberikan kontribusi bagi kemajuan teknologi energi terbarukan. Hasil tersebut menegaskan bahwa tujuan penelitian telah tercapai.

4. Kesimpulan

Profil sudu yang optimal menghasilkan arah distribusi aliran yang lebih seragam, pemanfaatan momentum air secara efektif, mengurangi turbulensi dan kerugian aliran sehingga memaksimalkan ekstraksi energi air dan meningkatkan kinerja turbin. Debit air yang lebih besar meningkatkan volume dan kecepatan aliran serta memaksimalkan momentum air sehingga meningkatkan gaya tangensial serta daya turbin. Kinerja turbin maksimal diperoleh dengan sudu profil A dan debit 120 LPM.

Ucapan terima kasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Muhammadiyah Metro atas dukungan pendanaan melalui hibah penelitian OPR. Ucapan terima kasih juga penulis tujukan kepada rekan-rekan dosen serta mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Metro atas kontribusinya dalam proses perancangan dan pengujian turbin.

Referensi

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia, "SIARAN PERS NOMOR: 046.Pers/04/SJI/2025 Tanggal: 26 Mei 2025 Menteri ESDM Umumkan RUPTL PLN 2025-2034, Serap Lebih dari 1,7 Juta Tenaga Kerja Baru," pp. 6–8, 2025.
- [2] IESR, "Laporan Status Energi Bersih Indonesia: Potensi, Kapasitas Terpasang, dan Rencana Pembangunan Pembangkit Listrik Energi Terbarukan 2019," *Iesr*, pp. 1–23, 2019, [Online]. Available: www.iesr.or.id
- [3] Retno Wahyudi and M. Irsyad, "Potensi Energy Terbarukan di Provinsi Lampung untuk Mewujudkan Kemandirian Energi," *J. Pros. Sinta Ft Unila*, vol. Vol 1, no. October, p. 318, 2018.
- [4] M. Mafruddin and D. Irawan, "PEMBUATAN TURBIN MIKROHIDRO TIPE CROSS-FLOW SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK DI DESA BUMI NABUNG TIMUR," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 3, no. 2, pp. 7–12, 2014, doi: 10.24127/trb.v3i2.12.
- [5] M. Mafruddin, A. Amrul, and A. Amrizal, "Studi Eksperimental Sudut Nosel Dan Sudut Sudu Terhadap Kinerja Turbin Cross-flow," *Mechanical*, vol. 8, no. 1, pp. 24–33, 2017, [Online]. Available: <http://journal.eng.unila.ac.id/index.php/mech/article/view/4/pdf>
- [6] M. Mafruddin and M. Marsuki, "PENGARUH BUKAAN GUIDE VANE TERHADAP KINERJA TURBIN PIKOHIDRO TIPE CROSS-FLOW," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 1, pp. 31–37, 2017, doi: 10.24127/trb.v6i1.464.
- [7] Mafruddin and D. Irawan, "PENGARUH DIAMETER DAN JUMLAH SUDU RUNNER TERHADAP KINERJA TURBIN CROSS-FLOW," vol. 7, no. 2, pp. 223–229, 2018.
- [8] Mafruddin and D. Irawan, "CROSS-FLOW TURBINE PROTOTYPE PERFORMANCE," *Pros. SNTTM XVIII, 9-10 Oktober 2019, KE26*, pp. 9–10, 2019.
- [9] V. R. Desai and N. M. Aziz, "An experimental investigation of cross-flow turbine efficiency," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 116, no. 3, pp. 545–550, 1994, doi: 10.1115/1.2910311.
- [10] R. I. Fauzy and P. H. Adiwibowo, "Studi Ekperimental Pengaruh Variasi Rasio Diameter Luar Dan

- Dalam Sudu Plat Datar Terhadap Daya Dan Efisiensi Turbin Crossflow Poros Horizontal,” *J. Tek. Mesin*, vol. Vol 08, no. 02, pp. 77–85, 2020.
- [11] H. Olgun, “INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF A CROSS-FLOW TURBINE,” vol. 964, no. April, pp. 953–964, 1998.
- [12] Y.-D. CHOI, J.-I. LIM, Y.-T. KIM, and Y.-H. LEE, “Performance and Internal Flow Characteristics of a Cross-Flow Hydro Turbine by the Shapes of Nozzle and Runner Blade,” *J. Fluid Sci. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 398–409, 2008, doi: 10.1299/jfst.3.398.
- [13] Y.-D. Choi and S.-W. Son, “Shape Effect of Inlet Nozzle and Draft Tube on the Performance and Internal Flow of Cross-Flow Hydro Turbine,” *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, vol. 36, no. 3, pp. 351–357, 2012, doi: 10.5916/jkosme.2012.36.3.351.
- [14] S. R. Yassen, “Optimization of the Performance of Micro Hydro-Turbines for Electricity Generation Optimization of the Performance of Micro Hydro-Turbines for Electricity Generation,” 2014.
- [15] N. Acharya, C. G. Kim, B. Thapa, and Y. H. Lee, “Numerical analysis and performance enhancement of a cross-flow hydro turbine,” *Renew. Energy*, vol. 80, pp. 819–826, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.01.064.
- [16] R. K. Ranjan, N. Alom, J. Singh, and B. K. Sarkar, “Performance investigations of cross flow hydro turbine with the variation of blade and nozzle entry arc angle,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 182, no. May 2018, pp. 41–50, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.075.
- [17] R. Soenoko, “First stage cross flow turbine performance,” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 11, no. 2, pp. 938–943, 2016.
- [18] D. Sutrimo and P. H. Adiwibowo, “Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Berpenampang L Terhadap Daya Dan Efisiensi Turbin Crossflow Poros Horizontal,” *J. Tek. Mesin UNESA*, vol. 07, no. 1, pp. 95–102, 2019, [Online]. Available: <https://jurnalmahasiswa.unesa.ac.id/index.php/jtm-unesa/article/view/28972>
- [19] D. K. Anam and P. H. Adiwibowo, “Experimental Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Setengah Lingkaran Terhadap Daya Dan Efisiensi Turbin Crossflow Poros Horizontal,” *J. Tek. Mesin*, vol. 08 No 01, pp. 129–138, 2020.
- [20] Z. Saleh, Y. Apriani, F. Ardianto, and R. Purwanto, “ANALISIS KARAKTERISTIK TURBIN CROSSFLOW KAPASITAS 5 kW,” *J. Surya Energy*, vol. 3, no. 2, p. 255, 2019, doi: 10.32502/jse.v3i2.1484.
- [21] R. Espina-Valdés, A. Fernández-Jiménez, J. Fernández Francos, E. Blanco Marigorta, and E. Álvarez-Álvarez, “Small cross-flow turbine: Design and testing in high blockage conditions,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 213, no. February, p. 112863, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112863.
- [22] Y. Nishi, Y. Yahagi, T. Okazaki, and T. Inagaki, “Effect of flow rate on performance and flow field of an undershot cross-flow water turbine,” *Renew. Energy*, vol. 149, pp. 409–423, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.12.023.
- [23] J. Du, Z. Shen, and H. Yang, “Study on the effects of runner geometries on the performance of inline cross-flow turbine used in water pipelines,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 40, no. June, p. 100762, 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100762.
- [24] A. H. S. Weerakoon, B. H. Kim, Y. J. Cho, D. D. Prasad, M. R. Ahmed, and Y. H. Lee, “Design optimization of a novel vertical augmentation channel housing a cross-flow turbine and

- performance evaluation as a wave energy converter,” *Renew. Energy*, vol. 180, pp. 1300–1314, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.08.092.
- [25] M. Naseem, A. Saleem, and M. S. Naseem, “Investigation of blade design parameters for performance improvement of hydraulic cross flow turbine,” *Ocean Eng.*, vol. 257, no. June, p. 111663, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111663.
- [26] H. Ross and B. Polagye, “Effects of dimensionless parameters on the performance of a cross-flow current turbine,” *J. Fluids Struct.*, vol. 114, p. 103726, 2022, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2022.103726.
- [27] T. Wang, T. Yamagata, and N. Fujisawa, “Effect of blade profile on the efficiency of a waterfall cross-flow hydro turbine,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 70, pp. 23–31, 2022, doi: 10.1016/j.esd.2022.07.004.
- [28] J. A. Chattha, A. Zaffar, B. Ibrahim, M. Asif, and M. A. Sarwar, “Optimisation of blade profiles of cross flow turbine,” *Int. J. Power Energy Convers.*, vol. 9, no. 4, p. 311, 2018, doi: 10.1504/ijpec.2018.10011716.
- [29] S. Sirojuddin, R. Ibnawati, and J. R. Syahri, “Efek Profil Sudu Turbin Banki terhadap Kekuatan Bahan dan Lintasan Air dalam Runner,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. 1, p. 59, 2021, doi: 10.21776/ub.jrm.2021.012.01.7.
- [30] D. A. Himawanto, H. Bisri, and A. Nurdin, “Pengaruh Geometri Sudu Inlet Bagian Tip Dan Hub Turbin Propeller Pada Unjuk Kerja Aliran Horizontal,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 77–84, 2022, doi: 10.21776/ub.jrm.2022.013.01.9.
- [31] D. H. Al-Janan and M. I. Saputra, “Optimasi Desain Sudu Turbin Dengan Paduan Savonius Dan Darrieus Untuk Meningkatkan Daya,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 2, pp. 677–687, 2023, doi: 10.21776/jrm.v14i2.1430.
- [32] G. Gun *et al.*, “DEVELOPMENT OF LOW-HEAD CROSSFLOW TURBINE,” vol. 16, no. 2, pp. 557–562, 2025, doi: 10.21776/jrm.v16i2.1718.
- [33] M. Mafruddin *et al.*, “Pengaruh Debit Air Dan Sudut Busur Masuk Nosel Terhadap Kinerja Turbin Cross-flow,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 14, no. 1, pp. 1–9, 2025, doi: 10.24127/trb.v14i1.3291.
- [34] Mafruddin, S. D. Handono, D. Irawan, and K. Ridhuan, “Improving Turbine Performance by Optimizing Nozzle Design,” *Int. J. Eng. Trends Technol.*, vol. 72, no. 12, pp. 55–63, 2024, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V72I12P105.
- [35] A. A. Adeyanju and K. Manohar, “The Performance of a Cross-flow Turbine as a Function of Flowrates and Guide Vane Angles,” *HighTech Innov. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 56–64, 2022, doi: 10.28991/HIJ-2022-03-01-06.
- [36] E. Y. Assefa and A. H. Tesfay, “Effect of Blade Profile on Flow Characteristics and Efficiency of Cross-Flow Turbines,” *Energies*, vol. 18, no. 12, pp. 1–33, 2025, doi: 10.3390/en18123203.
- [37] R. C. Adhikari and D. H. Wood, “A new nozzle design methodology for high efficiency crossflow hydro turbines,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 41, pp. 139–148, 2017, doi: 10.1016/j.esd.2017.09.004.
- [38] E. Satou *et al.*, “Development of an undershot cross-flow hydraulic turbine resistant to snow and ice masses flowing in an installation canal,” *Renew. Energy*, vol. 200, no. August, pp. 146–153, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.09.062.
- [39] C. L. Rantererung, S. Soeparman, R. Soenoko, and S. Wahyudi, “A Double Nozzle Cross Flow Turbine Fluid Flow Dynamics,” *J. Southwest*

Jiaotong Univ., vol. 55, no. 4, 2020,
doi: 10.35741/issn.0258-
2724.55.4.49.