



STUDI LITERATUR DESAIN & KINERJA TURBIN *CROSS-FLOW* MINI HIDRO

Alrivan Prananda Putra^{a*}, Fatih Ahmad Zaki^a, Widiya Anggraini^a, Andrias Gimnastyar^a, Alvaro Valentino^a, Khafid^a, Rico Arya Saputra^a, Priyo Heru Adiwibowo^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Jawa Timur 60231, Indonesia

*Corresponding authors at: alrivan.23233@mhs.unesa.ac.id (P.A. Alrivan) Tel.: +6282264359007

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 21 Mei 2025

Direvisi pada 9 Juli 2025

Disetujui pada 16 Agustus 2025

Tersedia daring pada 25 Agustus 2025

Kata kunci:

Turbin *cross-flow*, mikrohidro, efisiensi turbin

Keywords:

Cross-flow turbine, microhydro, turbine efficiency

ABSTRAK

Ketersediaan listrik yang belum merata di daerah-daerah terpencil masih menjadi tantangan besar di Indonesia. Salah satu solusi yang efektif dan ramah lingkungan adalah pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), yang memanfaatkan aliran air kecil untuk menghasilkan energi listrik. Di dalam sistem ini, turbin *cross-flow* banyak dipilih karena desainnya yang sederhana, kemampuannya bekerja stabil pada berbagai kondisi debit, dan efisiensinya yang relatif tinggi. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji lebih dalam parameter-parameter desain turbin *cross-flow* yang paling berpengaruh terhadap kinerjanya, dengan menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR). Puluhan artikel ilmiah dari tahun 2015 hingga 2024 dianalisis dari berbagai sumber terpercaya seperti *ScienceDirect*, *IEEE Xplore*, dan *Google Scholar*. Hasil telaah menunjukkan bahwa rasio diameter *runner* (D_2/D_1) yang ideal berada di kisaran 0,66–0,68 dan dapat menghasilkan efisiensi hingga 88%. Jumlah sudu terbaik berada antara 22–28 bilah, dengan sudut masuk sudu 16° – 22° dan sudut keluar 90° . Penggunaan *guide vane* berbentuk hidrofoil dapat meningkatkan efisiensi hingga 2%, terutama saat kondisi beban parsial, sementara nosel melengkung dengan sudut masuk sekitar 50° mampu mengarahkan aliran lebih stabil dan efisien. Dari sisi material, baja karbon rendah dan *stainless steel* AISI 304 dinilai paling tahan terhadap tekanan dan korosi. Kajian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi pengembangan sistem PLTMH yang efisien dan andal, sehingga bermanfaat langsung bagi masyarakat di daerah terpencil yang membutuhkan akses energi bersih dan berkelanjutan.

ABSTRACT

Unequal access to electricity remains a major challenge in the remote areas of Indonesia. To address this issue, an effective and environmentally friendly solution is to implement micro-hydro power plants (PLTMH), which use small-scale water flow to generate electricity. In these systems, cross-flow turbines are widely used due to their simple design, stable performance under varying flow conditions, and relatively high efficiency. The aim of this study was to explore the most influential design parameters affecting the performance of cross-flow turbines using systematic literature review (SLR). A total of 42 scientific articles published between 2015 and 2024 were reviewed from reputable sources such as ScienceDirect, IEEE Xplore, and Google Scholar. The findings showed that an optimal runner diameter ratio (D_2/D_1) ranging from 0.66 to 0.68 resulted in a turbine efficiency of up to 88%. The ideal number of blades was found to be between 22 and 28, while the optimal inlet blade angle was 16° – 22° and the optimal outlet angle was 90° . The use of hydrofoil-shaped guide vanes could increase efficiency by up to 2%, especially under partial load conditions, while a curved nozzle with an inlet angle of around 50° facilitated direct water flow more effectively. Low-carbon steel and stainless steel AISI 304 were considered to be the most suitable materials due to their durability against pressure and corrosion. The findings of this study serve as a reference for developing efficient and reliable PLTMH systems, offering practical benefits for communities in remote areas in need of sustainable and clean energy access.

1. PENGANTAR

Akses listrik yang merata masih menjadi tantangan besar di Indonesia, terutama di wilayah-wilayah terpencil yang belum terhubung dengan jaringan listrik nasional. Untuk mengatasi masalah ini, Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) menjadi alternatif yang menjanjikan karena selain ramah lingkungan, teknologi ini juga cocok untuk daerah dengan sumber daya air terbatas. Turbin *cross-flow* adalah salah satu jenis turbin mikrohidro yang banyak digunakan karena memiliki desain sederhana, efisiensi kerja yang stabil, serta mampu beradaptasi dengan perubahan debit air yang cukup signifikan (Adhikari & Wood, 2020; Khan dkk., 2021).

Efisiensi dan performa turbin *cross-flow* dipengaruhi oleh beberapa faktor desain utama, seperti rasio diameter *runner*, jumlah dan sudut sudu, desain *guide vane*, dan geometri nosel. Dengan mengoptimalkan faktor-faktor tersebut, turbin dapat mencapai efisiensi lebih dari 85 % dalam menghasilkan listrik (Maidana dkk., 2020; Du dkk., 2020). Selain itu, pemilihan material turbin juga berperan penting untuk menjaga daya tahan dan umur pakai, terutama dalam kondisi air yang mengandung mineral tinggi yang dapat menyebabkan korosi (Achebe dkk., 2020; Espina-Valdés dkk., 2020).

Berdasarkan pentingnya parameter desain ini, penelitian ini dilakukan dengan pendekatan studi literatur sistematis (*Systematic Literature Review*) untuk mengkaji pengaruh berbagai variabel desain terhadap kinerja turbin *cross-flow*. Tujuannya adalah merangkum dan menganalisis hasil-hasil penelitian terdahulu agar dapat memberikan rekomendasi desain yang optimal dan mendukung pengembangan energi mikrohidro yang lebih efisien dan berkelanjutan di Indonesia.

1.1. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro PLTMH

Pemenuhan kebutuhan energi listrik secara merata di Indonesia masih menjadi tantangan besar, khususnya di daerah-daerah terpencil yang belum sepenuhnya terhubung dengan jaringan listrik nasional. Dalam konteks ini, pengembangan energi terbarukan menjadi sangat penting, baik untuk alasan keberlanjutan lingkungan maupun ketahanan energi nasional. Salah satu bentuk energi terbarukan yang potensial dan ramah lingkungan adalah *Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro* (PLTMH), yang memanfaatkan aliran air dari sungai kecil atau irigasi tanpa memerlukan bendungan besar. PLTMH dikenal memiliki keunggulan dalam hal biaya operasional yang rendah, instalasi yang relatif mudah, serta umur operasional yang panjang (Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2023). Sistem ini sangat cocok digunakan di wilayah-wilayah dengan topografi berbukit dan debit air yang fluktuatif, seperti banyak ditemukan di daerah pedesaan Indonesia. Efektivitas dari sistem PLTMH sangat bergantung pada performa turbin air yang digunakan sebagai komponen utama dalam proses konversi energi

1.2. Turbin Cross-flow sebagai Solusi Mikrohidro

Turbin *cross-flow* menjadi salah satu jenis turbin yang paling banyak digunakan dalam aplikasi PLTMH karena mampu beroperasi dengan efisien pada berbagai kondisi debit air, termasuk debit rendah dan fluktuatif (Adhikari & Wood, 2020; Khan dkk., 2021). Turbin ini bekerja dengan prinsip aliran air yang melewati *runner* dua kali, yaitu saat masuk dan saat keluar, sehingga energi dari air dapat dimanfaatkan secara maksimal. Keunggulan lainnya terletak pada desainnya yang sederhana dan mudah difabrikasi, serta kemampuannya untuk tetap efisien meskipun berada pada beban parsial (Kumar dkk., 2023). Efisiensi turbin *cross-flow* sangat dipengaruhi oleh sejumlah parameter desain teknis seperti rasio diameter *runner* (D_2/D_1), jumlah dan sudut sudu, konfigurasi *guide vane*, serta bentuk nosel (Du dkk., 2020; As'ad, 2021; Maidana dkk., 2020). Misalnya, rasio diameter *runner* antara 0,66 hingga 0,68 dilaporkan mampu menghasilkan efisiensi hingga 88 % (Desai & Aziz, 1994), sementara jumlah sudu antara 22 hingga 28 terbukti memberikan kinerja terbaik dengan efisiensi hidrolik mencapai 83 % (Du dkk., 2020). Selain itu, penerapan *guide vane* berbentuk hidrofoil dan geometri nosel melengkung dengan sudut masuk sekitar 50° juga terbukti mampu meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan (Romero-Menco dkk., 2024; Saini dkk., 2022). Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan dengan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) guna merangkum temuan-temuan ilmiah terbaru dan mengidentifikasi konfigurasi desain turbin *cross-flow* yang paling efisien serta adaptif terhadap kondisi operasional lapangan, khususnya dalam konteks pengembangan energi mikrohidro yang berkelanjutan.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR), yaitu metode kajian pustaka yang dilakukan secara sistematis dan terstruktur untuk mengumpulkan, mengevaluasi, serta menyintesis hasil-hasil penelitian terdahulu yang relevan. Metode ini dipilih karena mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai berbagai parameter desain turbin *cross-flow* yang telah diuji dan diterapkan dalam sistem pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) di berbagai kondisi. Melalui SLR, peneliti dapat mengidentifikasi pola, tren, dan kesenjangan penelitian yang kemudian dirangkum menjadi rekomendasi desain yang efisien dan aplikatif. Proses pengumpulan literatur dimulai dengan merumuskan pertanyaan utama: “*Apa saja parameter desain turbin cross-flow yang paling berpengaruh terhadap peningkatan efisiensi dalam sistem PLTMH?*”. Berdasarkan pertanyaan ini, pencarian referensi dilakukan melalui sejumlah database ilmiah seperti ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, IEEE Xplore, dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan antara lain: “*cross-flow turbine design*”, “*microhydro efficiency*”, “*runner blade angle*”, “*nozzle geometry*”, dan “*guide vane in low head turbines*”. Artikel yang ditelusuri dibatasi pada periode 2015–2024 untuk menjaga relevansi dan kemutakhiran informasi, namun referensi penting dari tahun sebelumnya tetap digunakan jika memiliki kontribusi signifikan, seperti penelitian oleh Desai & Aziz (1994) yang menjadi rujukan dasar desain turbin.

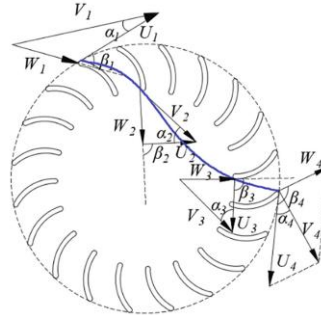
Setelah proses pencarian awal menghasilkan puluhan artikel, dilakukan seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Artikel yang dipilih adalah yang memuat data kuantitatif mengenai parameter teknis turbin *cross-flow*, seperti rasio diameter *runner* (D_2/D_1), jumlah dan sudut sudu, geometri nosel, desain *guide vane*, serta jenis material. Artikel non-peer-reviewed, laporan yang tidak menyajikan metode uji yang jelas, serta artikel yang hanya membahas aspek sosial atau ekonomi tanpa menyentuh aspek desain turbin, dikeluarkan dari analisis. Dari proses seleksi, diperoleh haartikel yang memenuhi kriteria. Analisis dilakukan dengan pendekatan deskriptif-komparatif, yaitu membandingkan hasil puluhan studi untuk melihat kecenderungan desain yang menghasilkan efisiensi tertinggi. Setiap data dikelompokkan berdasarkan kategori parameter utama, kemudian disintesis untuk mengidentifikasi desain yang paling konsisten memberikan hasil optimal. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam merumuskan rekomendasi desain turbin *cross-flow* yang efisien, adaptif, dan sesuai untuk diterapkan di lokasi-lokasi mikrohidro di Indonesia yang umumnya memiliki debit air fluktuatif dan tekanan rendah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Parameter kinerja turbin *cross-flow*

3.1.1. Dimensi runner turbine *cross-flow*

Desain diameter *runner* pada turbin *cross-flow* (CFT) memainkan peran penting dalam menentukan efisiensi dan daya keluaran turbin. Rasio diameter dalam terhadap diameter luar (D_2/D_1) memengaruhi distribusi aliran fluida dan transfer momentum di dalam *runner* seperti yang ditampilkan pada Gambar 2. Beberapa penelitian telah mengkaji pengaruh variasi rasio diameter ini terhadap kinerja turbin.

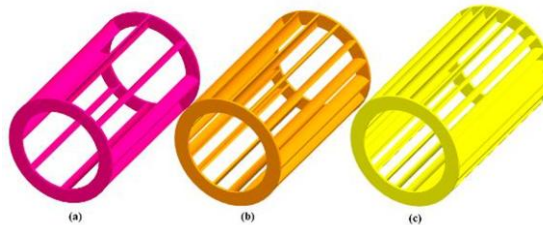


Gambar 1: Aliran arus melalui *runner* turbin *cross-flow* (Du dkk., 2020).

Rasio diameter *runner* sebesar 0,68 menghasilkan torsi dan daya keluaran yang lebih tinggi, meskipun menyebabkan penurunan head yang lebih besar (Du dkk., 2020). Efisiensi maksimum yang dicapai dalam studi ini adalah 50,9 %, dengan daya keluaran maksimum sebesar 2.285 W (Du dkk., 2020). Eksperimen dengan variasi rasio D_2/D_1 sebesar 0,60, 0,66, dan 0,72 menunjukkan bahwa rasio 0,66 memberikan efisiensi maksimum sebesar 62 % dan daya turbin sebesar 363,98 W (Mafruddin & Irawan, 2018). Rasio D_2/D_1 sebesar 0,68 juga ditemukan memberikan efisiensi tertinggi sebesar 88 % pada turbin berkapasitas 0,53 kW (Desai & Aziz, 1994). dapat disimpulkan bahwa rasio diameter dalam terhadap diameter luar (D_2/D_1) antara 0,66 hingga 0,68 memberikan kinerja optimal pada turbin *cross-flow*. Namun, perlu dicatat bahwa hasil ini dapat bervariasi tergantung pada kondisi operasi dan desain spesifik dari setiap turbin.

3.1.2. Jumlah sudu turbin *cross-flow*

Desain jumlah sudu pada turbin *cross-flow* merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi dan daya keluaran turbin. Jumlah sudu yang optimal dapat meningkatkan efisiensi dengan mengurangi kehilangan energi akibat turbulensi dan aliran yang tidak merata.

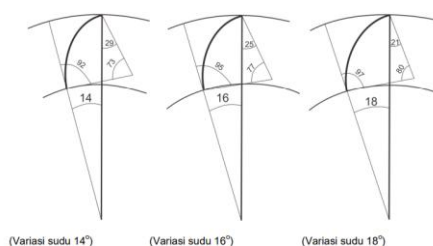


Gambar 2: Variasi jumlah sudu turbin *cross-flow* (As'ad, 2021)

Simulasi CFD digunakan untuk menganalisis pengaruh jumlah sudu terhadap kinerja turbin *cross-flow*, dan hasilnya menunjukkan bahwa turbin dengan 24 sudu pada Gambar 2 memiliki performa terbaik dibandingkan dengan 8 dan 16 sudu, dengan koefisien daya (C_p) tertinggi (As'ad, 2021). Pengaruh jumlah sudu terhadap efisiensi turbin *cross-flow* juga dianalisis, dan konfigurasi dengan 28 sudu menghasilkan efisiensi hidrolis tertinggi sebesar 83 %, dengan peningkatan efisiensi sebesar 4 % dibandingkan dengan desain 24 sudu (Du dkk., 2020). Variasi jumlah sudu sebesar 0 °, 5 °, 10 °, 15 °, dan 20 ° dikaji terhadap kinerja turbin *cross-flow*, dan hasilnya menunjukkan bahwa sudut sudu 15° menghasilkan daya listrik tertinggi sebesar 1.092 Watt, dengan efisiensi mekanik tertinggi (Wardani, 2020).

3.1.3. Sudut sudu turbin *cross-flow*

Desain sudut sudu pada turbin *cross-flow* (CFT) merupakan faktor krusial yang memengaruhi efisiensi dan daya keluaran turbin. Sudut masuk dan keluar sudu menentukan arah serta kecepatan aliran fluida saat berinteraksi dengan runner, sehingga secara langsung memengaruhi proses transfer energi dari fluida ke energi mekanik.

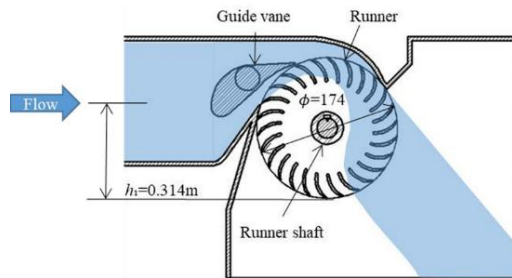


Gambar 3: Variasi sudut sudu (Assobuni dkk., 2024).

Pengaruh variasi sudut kemiringan sudu sebesar 14° , 16° , dan 18° terhadap efisiensi turbin crossflow menunjukkan bahwa sudut 18° menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 69,90 % dan daya maksimum mencapai 415,57 W pada pembebanan 6 kg (Assobuni dkk., 2024). Peningkatan sudut sudu menyebabkan peningkatan kecepatan putar poros dan gaya dorong fluida yang lebih besar terhadap sudu, sehingga menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi. Bentuk geometri sudu pada masing-masing sudut tersebut ditampilkan pada Gambar 3, yang menggambarkan perbedaan desain sudu dalam konfigurasi 14° , 16° , dan 18° . Sementara itu, Verma dkk. (2017) melaporkan bahwa penggunaan sudut masuk sudu sebesar 26° – 28° pada turbin *cross-flow* dapat menghasilkan efisiensi hingga 93 %, terutama saat dipadukan dengan sudut serang sebesar 8° . Hasil ini menguatkan pentingnya penyesuaian sudut terhadap arah masuk fluida. Selain itu, Prabowoputra dkk. (2022) mengevaluasi kinerja sudut sudu tetap 20° dengan berbagai jumlah sudu dan menemukan bahwa konfigurasi tersebut memberikan performa lebih baik dalam kondisi aliran berkecepatan rendah.

3.1.4. Guide vane

Guide vane (sirip pengarah) adalah komponen statis dalam turbin air yang berfungsi untuk mengarahkan aliran air ke sudu optimal sebelum mengenai bilah-bilah turbin (Saini dkk., 2022). Fungsinya sangat penting dalam mengontrol arah dan jumlah aliran masuk ke runner, sehingga mempengaruhi efisiensi konversi energi fluida menjadi energi mekanik.

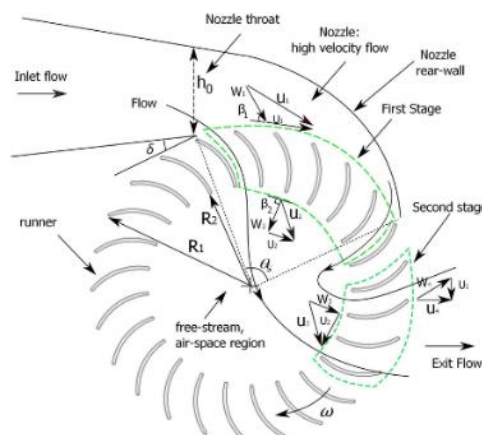


Gambar 4: Komponen turbin *cross-flow* dengan *guide vane* (Tanaka dkk., 2022)

Gambar 4 memperlihatkan konfigurasi *guide vane* dalam turbin *cross-flow*, di mana aliran air diarahkan ke *runner* melalui sudut tertentu yang dapat disesuaikan untuk kondisi beban berbeda. Penempatan *guide vane* di sisi kanan dekat nozzle dengan sudut optimal 55° untuk vane simetris dan 45° untuk vane asimetris telah terbukti meningkatkan efisiensi hingga 80,1% berdasarkan simulasi dan pengujian laboratorium. *Guide vane* ini mampu mengurangi turbulensi dan memperlancar aliran ke tahap kedua bilah runner, sehingga mengurangi kehilangan energi pada kondisi beban parsial (Saini dkk., 2022). Perbandingan dua jenis *guide vane* di inlet nozzle turbin *cross-flow*: tipe ayun (*swing-type*) dan tipe segmen melengkung (*circular segment*). Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa tipe *circular segment* menghasilkan aliran yang lebih stabil dan efisien pada kondisi beban parsial dibanding tipe ayun, karena mampu mempertahankan sudut aliran optimal dan mengurangi pemisahan aliran yang menyebabkan kavitasi dan getaran (Tanaka dkk., 2022). Dari kedua penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa bentuk dan posisi *guide vane* sangat berperan penting dalam meningkatkan efisiensi turbin, khususnya pada kondisi beban parsial.

3.1.5. Geometri nosel

Geometri nosel dalam turbin *cross-flow* memegang peran penting untuk mengarahkan aliran air secara optimal ke runner. Nosel dirancang untuk menghasilkan profil aliran yang seragam dan terfokus, sehingga sudut impak air ke sudu *runner* mendekati kondisi optimal.



Gambar 5: Parameter desain nosel pada turbin *cross-flow* (Warjito dkk., 2021)

Geometri nosel berperan penting dalam meningkatkan efisiensi turbin, terutama saat debit air berfluktuasi, di mana pengaturan sudut nosel dan penggunaan *guide vane* terbukti efektif (Adeyanju dan Manohar, 2022). Untuk turbin mikrohidro, nosel berbentuk semi-elips atau melengkung disarankan karena menghasilkan aliran laminar sebelum memasuki *runner* (Adeyanju dan Manohar, 2022). Gambar 5 memperlihatkan bagaimana nosel berfungsi dalam mengarahkan aliran berkecepatan tinggi dari *nozzle throat* menuju runner, yang terbagi dalam dua tahap rotasi, yaitu *first stage* dan *second stage* (Warjito dkk., 2021). Sudut masuk aliran (λ) juga krusial karena memengaruhi arah aliran ke runner. Variasi sudut λ antara 50° hingga 90° menunjukkan bahwa sudut 50° menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 60,6 % karena aliran lebih sejajar dengan sudut sudu, sehingga mengurangi turbulensi (Warjito dkk., 2021).

Dimensi nosel seperti panjang, lebar, dan radius *throat* turut memengaruhi percepatan dan distribusi aliran. Nosel dengan panjang 400 mm, lebar 124 mm, dan radius *throat* 75 mm menghasilkan kecepatan aliran 0,135 m/s dan meningkatkan daya output hingga 8,38 Watt saat digunakan dengan *runner* Stainless Steel 304 (Sari dkk., 2022). Selain itu, *guide vane* internal dengan sudut 20° mampu meningkatkan efisiensi dari 63,67 % menjadi 67,26 % dengan mengurangi area *recirculation* dan memperbaiki distribusi tekanan pada sudu (Romero-Menco dkk., 2024). Berikut tabel perbandingan efisiensi berdasarkan variasi geometri nosel:

Tabel 1: Perbandingan Penelitian tentang Geometri Nosel Turbin *Cross-flow*

No	Peneliti	Fokus Geometri Nosel	Metode Analisis	Hasil Efisiensi	Kondisi Khusus
1	Warjito dkk. (2021)	Variasi sudut masuk λ (50 °, 60 °, 70 °, 80 °, 90 °)	CFD 6-DoF + Eksperimen	Efisiensi maksimum 60,6 % pada sudut $\lambda = 50$ °	Debit air rendah, simulasi pico-hidro
2	Romero-Menco dkk. (2024)	Nosel dengan dan tanpa <i>guide vane</i> internal (GV 20°)	CFD 3D + Validasi eksperimen	Tanpa GV: 63,67 %, Dengan GV 20 °: 67,26 %	Aplikasi mini-hidro, desain modular
3	Sari dkk. (2022)	Variasi ukuran fisik nosel (panjang 400 mm, lebar 124 mm)	Simulasi CFD 3D	Daya output meningkat hingga 8,38 Watt	Penggunaan <i>runner stainless steel</i>

3.1.6. Ketahanan material pada turbin *cross-flow*

Material merupakan faktor penting yang perlu diperhatikan untuk memastikan kelangsungan sistem dalam jangka panjang. Pemilihan pada material didasarkan dari kekuatan tarik, daya tahan terhadap deformasi, daya tahan deformasi, dan biaya produksi. Material melakukan pendekatan *performance index* dari Ashby, yang mengutamakan rasio antara kekuatan luluh terhadap massa jenis material.

Hasil dari pendekatan menunjukkan bahwa baja karbon rendah (low carbon steel) adalah pilihan yang optimal, karena kekuatan yang memadai dan biaya produksi yang murah, dengan deformasi maksimum yang masih dalam batas aman saat dikenai tekanan hidrolik sebesar 50,83 kPa (Achebe dkk, 2020).



Gambar 6: (a) Bagian-bagian turbin yang difabrikasi (b) Turbin aliran silang yang telah dirakit (Achebe dkk., 2020)

Gambar 6 menampilkan proses fabrikasi (Gambar 6a) dan hasil akhir perakitan turbin *cross-flow* (Gambar 6b). Ilustrasi ini menunjukkan realisasi fisik dari desain turbin, termasuk komponen utama seperti runner, nosel, dan *guide vane*, yang telah dirancang berdasarkan parameter desain yang telah dikaji sebelumnya. Secara teknis, material diuji melalui simulasi menggunakan ANSYS untuk mengevaluasi deformasi dan tegangan von mises. Material yang digunakan dalam pembuatan turbin harus memiliki ketahanan terhadap korosi dan abrasi, terutama jika turbin dipasang di lingkungan Sungai atau saluran air yang memiliki kandungan mineral tinggi. Penggunaan stainless steel, seperti AISI 304, telah terbukti efektif dalam meningkatkan daya tahan turbin terhadap kondisi lingkungan seperti sungai (Espina-Valdés dkk., 2020)

3.2. Metrik Kinerja

3.2.1. Pengaruh parameter desain pada kinerja turbine

Parameter Parameter desain memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja turbin *cross-flow*, terutama dalam konteks efisiensi energi dan daya keluaran yang dihasilkan. Salah satu parameter terpenting adalah rasio diameter dalam terhadap diameter luar *runner* (D_2/D_1), yang menentukan karakteristik aliran fluida saat memasuki dan meninggalkan runner. Penelitian menunjukkan bahwa rasio diameter sekitar 0,66 hingga 0,68 mampu menghasilkan efisiensi optimal, dengan daya keluaran yang relatif tinggi. Konfigurasi ini dinilai mampu menciptakan distribusi tekanan yang lebih merata dan mengurangi kerugian energi akibat turbulensi di dalam *runner* (Du dkk., 2020; Mafruddin & Irawan, 2018; Desai & Aziz, 1994). Jumlah sudu atau bilah pada *runner* juga memengaruhi efisiensi konversi energi. Jumlah sudu yang terlalu sedikit dapat menyebabkan kehilangan energi karena aliran tidak ditangkap secara efektif, sedangkan terlalu banyak bilah dapat meningkatkan hambatan hidrodinamis. Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen, jumlah sudu antara 22 hingga 28 terbukti memberikan performa terbaik. Misalnya, desain dengan 24 sudu menghasilkan koefisien daya tertinggi dalam simulasi CFD, sedangkan desain dengan 28 sudu mampu meningkatkan efisiensi hidrolik hingga 83 % (As'ad, 2021; Du dkk., 2020). Penyesuaian jumlah sudu harus disesuaikan dengan kecepatan aliran dan kapasitas turbin untuk menghindari overdesign yang justru dapat menurunkan performa. Faktor lain yang sangat berpengaruh adalah sudut sudu, baik sudut masuk maupun sudut keluar. Sudut masuk antara 16° hingga 22° direkomendasikan untuk menghasilkan interaksi fluida yang optimal dengan bilah turbin, sedangkan sudut keluar sebesar 90° menjaga arah aliran tetap sejajar dengan eksit runner, meminimalkan kehilangan energi akibat defleksi (Maidana dkk., 2020; Prabowoputra dkk., 2022). Eksperimen juga menunjukkan bahwa sudut sudu sekitar 20 ° hingga 28 ° mampu memberikan efisiensi maksimum, khususnya dalam kondisi aliran rendah seperti yang umum ditemui di sistem mikrohidro pedesaan (Verma dkk., 2024).

Penggunaan *guide vane* atau sirip pengarah juga memainkan peran vital dalam mengoptimalkan arah dan kecepatan aliran menuju bilah turbin. *Guide vane* yang dirancang secara simetris atau asimetris, serta dapat diatur (*adjustable*), terbukti dapat meningkatkan efisiensi sistem sebesar 0,5–2 % tergantung pada kondisi beban dan integrasi dengan sistem kontrol otomatis (Saini dkk., 2022; Chen dkk., 2021). Dengan mengarahkan fluida ke sudut optimal, *guide vane* mampu mengurangi turbulensi dan meningkatkan jumlah energi yang berhasil dikonversi menjadi energi mekanik. Geometri nozel juga berkontribusi besar terhadap kinerja keseluruhan turbin *cross-flow*. Desain nozel yang melengkung atau semi-elips dapat menciptakan aliran laminar sebelum memasuki runner, mengurangi kehilangan energi akibat recirculation dan separasi aliran. Penyesuaian sudut masuk nozel, terutama pada kisaran 50 °, menghasilkan efisiensi tertinggi dalam berbagai kondisi debit (Warjito dkk., 2021; Romero-Menco dkk., 2024). Selain itu, penggunaan *guide vane* internal dalam nozel terbukti meningkatkan distribusi tekanan dan memperkecil zona stagnan.

Ketahanan material menjadi faktor pendukung penting dalam menjaga performa jangka panjang turbin *cross-flow*. Material yang digunakan harus mampu menahan tekanan hidraulik dan tahan terhadap korosi serta abrasi. Pendekatan *performance index* Ashby menunjukkan bahwa baja karbon rendah adalah pilihan optimal karena kekuatan yang memadai dan biaya produksi yang rendah (Achebe dkk., 2020). Namun, dalam lingkungan air dengan kandungan mineral tinggi, material seperti stainless steel AISI 304 lebih disarankan karena ketahanannya terhadap korosi telah terbukti meningkatkan daya tahan turbin (Espina-Valdés dkk., 2020).

3.2.2. Pengaruh kondisi debit aliran pada kinerja turbin

Debit aliran merupakan parameter penting yang mempengaruhi kinerja turbin *Cross-flow*. Turbin *Cross-flow* mampu beroperasi secara efisien pada debit aliran antara 0,04 m³/s hingga 5 m³/s, sehingga menjadikannya pilihan yang adaptif untuk aplikasi mikrohidro di berbagai kondisi geografis (Dendy dkk., 2023). Desain nosel memiliki peranan krusial dalam mengoptimalkan aliran air menuju runner turbin *Cross-flow*. Penelitian terbaru oleh (Mafruddin dkk., 2019) mengungkapkan bahwa geometri nosel yang telah dioptimalkan dapat meningkatkan koefisien kecepatan aliran hingga 0,98, yang secara langsung berkontribusi pada peningkatan efisiensi keseluruhan turbin. Penelitian oleh (Ishak dkk., 2022) menerapkan teknik optimasi multi-objektif untuk merancang nosel turbin *Cross-flow* yang mampu memberikan distribusi aliran yang optimal dalam berbagai kondisi debit. Temuan penelitian menunjukkan adanya peningkatan efisiensi sebesar 4-7 % pada kondisi debit parsial berkat desain nosel yang telah dioptimalkan. Salah satu ciri penting dalam penilaian kinerja turbin adalah reaksi terhadap perubahan debit aliran. Penelitian yang dilakukan oleh (Kumar dkk., 2023) menganalisis respons dinamis berbagai tipe turbin terhadap fluktuasi debit aliran dalam jangka pendek dan jangka panjang.

Tabel 2: Perbandingan Respons Turbin terhadap Fluktuasi Debit (Kumar dkk., 2023; Lubitz dkk., 2014).

Jenis Turbin	Respons terhadap Fluktuasi Jangka Pendek	Respons terhadap Fluktuasi Musiman	Waktu Respons
<i>Cross-flow</i>	Sangat baik	Sangat baik	Cepat (1-2 detik)
Archimedes Screw	Baik	Sangat baik	Menengah (3-4 detik)
Pico	Moderat	Baik	Menengah (2-5 detik)
Pelton	Sangat baik	Moderat	Sangat cepat

(

3.2.3. Pengaruh Efisiensi turbin pada berbagai kondisi operasi

Studi perbandingan oleh (Kumar dkk., 2023) menganalisis efisiensi berbagai jenis turbin dalam kondisi beban parsial, yang sering terjadi dalam aplikasi mikrohidro. Hasil penelitian menunjukkan bahwa turbin *Cross-flow* memiliki keunggulan signifikan dalam kondisi beban parsial dibandingkan dengan turbin Archimedes dan Pico.

Tabel 3: Perbandingan Efisiensi pada Berbagai Kondisi Beban (Kumar dkk., 2023; Imawati dkk., 2022)

Jenis Turbin	Efisiensi pada Beban Penuh (%)	Efisiensi pada Beban 70% (%)	Efisiensi pada Beban 40% (%)
<i>Cross-flow</i>	82-88	80-85	75-80
Archimedes	85-92	75-82	60-68
Pico	88-94	80-85	70-75
Pelton	85-90	83-88	80-85

4. KESIMPULAN

Desain turbin *cross-flow* mini hidro sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor utama yang berperan besar dalam menentukan seberapa efisien dan optimal turbin tersebut bekerja. Salah satu faktor penting adalah rasio diameter dalam terhadap diameter luar runner, yang idealnya berada di antara 0,66 sampai 0,68. Rasio ini membantu menciptakan distribusi tekanan yang merata dan memungkinkan efisiensi turbin mencapai hingga 88 %, sehingga pemilihan dimensi *runner* tidak bisa dianggap remeh. Selain itu, jumlah sudu atau bilah turbin yang ideal berkisar antara 22 hingga 28, karena jumlah tersebut dapat menangkap aliran air dengan baik tanpa menimbulkan hambatan berlebihan, menghasilkan efisiensi hidrolik tertinggi sekitar 83 %. Sudut sudu juga memainkan peran penting, di mana sudut masuk antara 16 ° sampai 22 ° dan sudut keluar sekitar 90 ° memastikan interaksi yang tepat antara aliran air dan runner, sehingga daya keluaran turbin meningkat, terutama pada kondisi debit air yang rendah. Efisiensi turbin bisa ditingkatkan lagi sekitar 2 % dengan memasang *guide vane* berbentuk hidrofoil yang berfungsi mengarahkan aliran air secara lebih optimal dan mengurangi turbulensi, khususnya saat turbin beroperasi di beban parsial. Selain itu, bentuk nosel yang melengkung dengan sudut masuk aliran sekitar 50 ° mampu menghasilkan aliran air yang lebih halus dan fokus, yang mengurangi kehilangan energi dan meningkatkan efisiensi hingga 67,26 % ketika dipadukan dengan *guide vane* internal. Pemilihan material juga sangat penting; baja karbon rendah sering dipilih karena kekuatan dan

biayanya yang efisien, namun untuk lingkungan air dengan kandungan mineral tinggi, stainless steel AISI 304 lebih direkomendasikan karena ketahanannya terhadap korosi dan abrasi.

Turbin *cross-flow* sendiri terbukti mampu beradaptasi dengan baik pada berbagai variasi debit aliran antara 0,04 hingga 5 m³/s, serta memberikan respons yang cepat terhadap fluktuasi debit baik jangka pendek maupun musiman, sehingga cocok digunakan di daerah dengan kondisi aliran yang berubah-ubah. Lebih jauh, turbin ini mampu mempertahankan efisiensi tinggi pada berbagai kondisi beban, termasuk saat beban parsial, dengan efisiensi yang berkisar antara 75 % hingga 88 %, yang menegaskan keunggulannya dibandingkan turbin lain seperti Archimedes dan Pico. Dengan demikian, kombinasi optimal antara desain *runner*, jumlah dan sudut sudu, penggunaan *guide vane*, geometri nosel, serta pemilihan material yang tepat, ditambah dengan penyesuaian terhadap kondisi debit aliran, menjadi kunci penting dalam menciptakan turbin *cross-flow* yang efisien, adaptif, dan andal sebagai solusi pembangkit listrik tenaga mikrohidro yang berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan jurnal ini dengan baik..

DAFTAR PUSTAKA

- Achebe, C. H., Okafor, O. C., & Obika, E. N. (2020). Design and implementation of a crossflow turbine for Pico hydropower electricity generation. *Heliyon*, 6(8), e04523.
- Adanta, D., Sari, D. P., Syofii, I., Prakoso, A. P., Saputra, M. A. A., & Thamrin, I. (2023). Performance Comparison of Crossflow Turbine Configuration Upper Blade Convex and Curvature by Computational Method. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 9(1), 154–165.
- Adeyanju, A. A., & Manohar, K. (2022). The performance of a *cross-flow* turbine as a function of flowrates and *guide vane* angles. *HighTech and Innovation Journal*, 3(1), 56–64.
- As'ad, M. M., Febrianto, A. J., & Prabowoputra, D. M. (2021). Analisa performa hidro-turbin *cross-flow* dengan sudut diameter *runner* 10° dan jumlah sudu 8, 16, dan 24 menggunakan metode CFD. *Journal of Mechanical Engineering*, 5(1), 21–26.
- Desai, V. R., & Aziz, N. M. (1994). Parametric evaluation of *cross-flow* turbine performance. *Journal of energy engineering*, 120(1), 17–34.
- Du, J., Shen, Z., & Yang, H. (2020). Study on the effects of *runner* geometries on the performance of inline *cross-flow* turbine used in water pipelines. *Sustainable energy technologies and assessments*, 40, 100762.
- Espina-Valdés, R., Fernández-Jiménez, A., Fernández Francos, J., Blanco Marigorta, E., & Álvarez-Álvarez, E. (2020). Small *cross-flow* turbine: Design and testing in high blockage conditions. *Energy Conversion and Management*, 213, 112863.
- Imawati, I., Febiansyah, M., Novtrianda, E. K. G., & Mubarak, H. (2022). Portable Pico-hydro Power Plant with Archimedes Screw Turbine in Pelangi Reservoir of Universitas Islam Indonesia. *Elkha*, 14(2), 132.
- Mafruddin, M., Irawan, R. M., Setiawan, N., Rajabiah, N., & Irawan, D. (2020). Pengaruh jumlah sudu dan diameter nosel terhadap kinerja turbin pelton. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 8(2), 214–218.
- Muhammad Ali Assobuni, Tri Rachmanto, I Wayan Joniarta (2024) Effect of Angle of Turbine Cross Flow Tilt Angle on Micro Hydro Power Station Performance. *Dinamika Teknik Mesin: Jurnal Keilmuan dan Terapan Teknik Mesin*
- Prabowoputra, D. M. (2022). Simulation Study on Cross Flow Turbine Performance with an Angle of 20° to the Variation of the Number of Blades. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 11(2), 105–112.
- Romero-Menco, F., Pineda-Aguirre, J., Velásquez, L., Rubio-Clemente, A., & Chica, E. (2024). Effects of the Nozzle Configuration with and without an Internal *Guide vane* on the Efficiency in *Cross-flow* Small Hydro Turbines. *Processes*, 12(5), 938.
- Saini, G., Saini, R. P., & Singal, S. K. (2022). Numerical investigations on performance improvement of cross flow hydro turbine having *guide vane* mechanism. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(1), 771–795.
- Sari, D., Pratama, M. R., & Wibowo, A. (2022). Pengaruh variasi ukuran fisik nosel terhadap daya output turbin *cross-flow* menggunakan simulasi CFD 3D. *Jurnal Teknik Energi dan Mesin*, 12(1), 45–58.
- Tanaka, T., Otsuka, K., Goto, M., & Iio, S. (2022). Flow characteristics around a *guide vane* in *cross-flow* turbine. *Journal of Physics: Conference Series*, 2217(1), 012061.
- Thakur, R., Kashyap, T., Kumar, R., Saini, R. K., Lee, D., Kumar, S., & Singh, T. (2024). Potential of the Archimedes screw to generate sustainable green energy for mini, micro, and pico hydro Turbine power stations: An extensive analysis. *Energy Strategy Reviews*, 55(September), 101514.
- Usman, I., & Karim, I. J. A. (2022). Pengaruh Panjang Nosel Konvergen sebagai Pengarah Aliran Masuk Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin. *DINAMIKA: Jurnal Teknik Mesin*, 7(2).

-
- Verma, V. K., Gaba, V. K., & Bhowmick, S. (2024). An experimental investigation of the performance of *cross-flow* turbine: impact of number of blades in runner. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 30(5), 612–622.
- Wardani, S. (2020). Experimental investigation on performance of *cross-flow* hydro turbines with different *guide vane* angles. *ResearchGate*.
- Warjito, A., Santoso, A. B., & Suryanto, E. (2021). Analisis performa turbin *cross-flow* dengan variasi sudut masuk nozzle menggunakan metode CFD 6-DoF dan eksperimen. *Jurnal Teknik Energi dan Mesin*, 11(2), 123–135.