

ANALISIS PENGARUH VARIASI JUMLAH SUDU TERHADAP KINERJA TURBIN CROSSFLOW DI PT XYZ

Farhan Rahmat Putra, Andre Kurniawan, Yolli Fernanda, Randi Purnama Putra

Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

E-mail : farhan.rahmatputra13@gmail.com

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of blade number variation on the performance of a crossflow turbine used in the Micro-Hydro Power Plant (PLTMH) system at PT XYZ. The research was conducted using a numerical simulation approach based on Computational Fluid Dynamics (CFD) with Solidworks 2022 for geometry modeling and ANSYS Fluent 2025 R1 for fluid flow simulation. The variations of blade numbers investigated were 18, 24, 30, and 32 blades, with constant operating parameters including a flow rate of 0.03678 m³/s, a head of 0.3 m, and a rotational speed of 1500 rpm. The simulation results indicate that the number of blades significantly affects the torque, output power, and efficiency of the crossflow turbine. The configuration with 18 blades produced the best performance, achieving a torque of 21.39 Nm, an effective power of 3359.64 W, and an efficiency of 31.09%, while configurations with 24 and 32 blades showed a significant decrease in efficiency to around 6%. The analysis of velocity contours, pressure contours, and streamlines revealed that the 18-blade configuration provides a more stable and focused flow with uniform pressure distribution along the blade's leading edge, resulting in greater tangential force on the runner shaft. In contrast, increasing the number of blades causes higher turbulence and energy losses. Therefore, it can be concluded that the 18-blade configuration is the most optimal design for achieving efficient crossflow turbine performance under the specified operating conditions.

Keywords: crossflow turbine, blade number, CFD, ANSYS Fluent, efficiency, torque.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah sudu terhadap kinerja turbin crossflow pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) PT XYZ. Metode yang digunakan adalah simulasi numerik berbasis Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan bantuan perangkat lunak Solidworks 2022 untuk pemodelan geometri dan ANSYS Fluent 2025 R1 untuk simulasi aliran fluida. Variasi jumlah sudu yang diteliti terdiri dari 18, 24, 30, dan 32 sudu, dengan parameter operasi tetap berupa debit 0,03678 m³/s, head 0,3 m, dan kecepatan putar 1500 rpm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa jumlah sudu sangat berpengaruh terhadap torsi, daya efektif, dan efisiensi turbin crossflow. Konfigurasi 18 sudu menghasilkan kinerja terbaik dengan torsi 21,39 Nm, daya efektif 3359,64 W, dan efisiensi 31,09%, sedangkan pada 24 dan 32 sudu terjadi penurunan efisiensi hingga sekitar 6%. Analisis velocity contour, pressure contour, dan streamline menunjukkan bahwa pada jumlah sudu 18, aliran fluida lebih stabil, terfokus, dan menghasilkan distribusi tekanan yang merata pada leading edge sudu, sehingga gaya puntir terhadap poros lebih besar. Sementara itu, peningkatan jumlah sudu menyebabkan turbulensi dan rugi-rugi energi yang lebih tinggi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa jumlah sudu 18 merupakan

konfigurasi paling optimal untuk menghasilkan performa turbin crossflow yang efisien pada kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian ini.

Kata kunci: turbin crossflow, jumlah sudu, CFD, ANSYS Fluent, efisiensi, torsi.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi, perkembangan industri, serta meningkatnya jumlah penduduk. Energi listrik telah menjadi salah satu kebutuhan utama dalam menunjang aktivitas masyarakat modern, baik untuk keperluan rumah tangga, industri, maupun layanan publik. Namun, hingga saat ini sebagian besar kebutuhan energi listrik di Indonesia masih dipasok dari pembangkit listrik berbasis energi fosil, seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Ketergantungan yang tinggi terhadap energi fosil menimbulkan berbagai persoalan, di antaranya keterbatasan ketersediaan sumber daya, fluktuasi harga energi, serta dampak lingkungan berupa emisi gas rumah kaca yang berkontribusi pada pemanasan global (Sihombing et al., 2021).

Dalam upaya mengurangi ketergantungan pada energi fosil, pemerintah Indonesia terus mendorong pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT). Salah satu potensi EBT yang cukup besar di Indonesia adalah energi air, yang dapat dimanfaatkan melalui pembangunan pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dan pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH). PLTMH menjadi salah satu pilihan menarik karena mampu memanfaatkan aliran sungai atau saluran irigasi dengan kapasitas kecil hingga menengah, sehingga cocok untuk diterapkan di daerah pedesaan atau kawasan industri yang jauh dari pasokan listrik utama (Hartanto et al., 2020).

Turbin air merupakan komponen

utama dalam sistem PLTMH karena berfungsi mengubah energi potensial aliran air menjadi energi mekanik dan selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik melalui generator. Di antara berbagai jenis turbin air, turbin crossflow menjadi salah satu pilihan yang banyak digunakan pada PLTMH skala kecil hingga menengah. Turbin crossflow dikenal sebagai turbin impuls dengan desain sederhana, biaya pembuatan yang relatif rendah, dan kinerja yang cukup baik pada kondisi debit menengah serta head rendah hingga menengah. Selain itu, turbin crossflow juga memiliki keunggulan dalam menghadapi aliran yang bercampur dengan sampah atau material padat, karena bentuknya yang sederhana membuatnya lebih tahan terhadap penyumbatan dibandingkan jenis turbin lain (Rantererung, 2024).

Salah satu faktor penting yang memengaruhi kinerja turbin crossflow adalah jumlah sudu pada runner. Jumlah sudu berpengaruh terhadap pola aliran fluida, distribusi gaya pada sudu, serta besarnya torsi dan daya yang dihasilkan. Jika jumlah sudu terlalu sedikit, kontak antara fluida dan sudu berkurang sehingga energi yang ditransfer ke runner menjadi tidak optimal. Sebaliknya, jika jumlah sudu terlalu banyak, akan menimbulkan rugi-rugi aliran akibat interaksi antar sudu yang semakin rapat. Oleh karena itu, pemilihan jumlah sudu yang tepat sangat penting untuk memperoleh kinerja turbin yang maksimal (Sihombing et al., 2021).

Penelitian mengenai variasi jumlah sudu turbin crossflow telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Hartanto et al. (2020) menganalisis desain turbin crossflow dengan berbagai variasi sudu untuk aplikasi PLTMH skala kecil, dan menemukan

bahwa terdapat jumlah sudu optimal yang mampu menghasilkan efisiensi lebih tinggi dibandingkan desain standar. Sementara itu, Rantererung (2024) menggunakan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk mengevaluasi kinerja turbin impuls dengan variasi sudu dan menunjukkan bahwa metode numerik mampu memberikan gambaran pola aliran serta distribusi tekanan yang lebih detail dibandingkan metode analitik. Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan pentingnya pemanfaatan metode CFD dalam menganalisis desain turbin, termasuk turbin crossflow, agar dapat diperoleh informasi yang lebih akurat mengenai pengaruh jumlah sudu terhadap kinerja turbin.

CFD telah berkembang menjadi alat analisis yang andal dalam bidang teknik fluida, khususnya untuk menganalisis kinerja turbin air. Melalui CFD, dapat dilakukan simulasi aliran fluida di sekitar sudu turbin, sehingga diperoleh informasi mengenai pola aliran, distribusi kecepatan, tekanan, torsi, hingga daya yang dihasilkan. Hal ini memberikan keuntungan karena analisis dapat dilakukan tanpa perlu membuat prototipe fisik yang memakan biaya besar dan waktu lama. Selain itu, variasi desain turbin seperti jumlah sudu dapat diuji secara lebih fleksibel dengan simulasi numerik.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis numerik variasi jumlah sudu turbin crossflow, yaitu 18, 24, dan 32 sudu, terhadap kinerja turbin dan kapasitas energi yang dihasilkan. Oleh karena

itu, dalam penelitian ini akan dilakukan studi numerik menggunakan CFD untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah sudu terhadap kinerja turbin crossflow pada PLTMH PT XYZ.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan simulasi numerik menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD). Analisis dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Solidworks 2022 untuk pemodelan geometri turbin crossflow dan ANSYS Fluent 2025 R1 untuk simulasi aliran fluida. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi jumlah sudu (18, 24, dan 32 sudu) terhadap kinerja turbin crossflow pada PLTMH PT XYZ. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jumlah sudu runner turbin crossflow (18, 24, dan 32 sudu), sedangkan variabel terikatnya meliputi torsi, daya turbin, dan efisiensi turbin hasil simulasi. Nilai-nilai tersebut diperoleh dari hasil simulasi numerik CFD dan dibandingkan untuk setiap variasi jumlah sudu, sehingga kinerja turbin dapat ditentukan berdasarkan respon yang dihasilkan terhadap perubahan jumlah sudu. Adapun variabel kontrol yang dijaga tetap meliputi debit air (Q), head (H), diameter runner (D), kecepatan putar (n), serta kondisi batas (boundary condition) seperti velocity inlet, pressure outlet, dan dinding runner, agar hasil simulasi dapat dibandingkan secara objektif dan perubahan performa turbin benar-benar disebabkan oleh perbedaan jumlah sudu.

Penelitian ini dilakukan secara simulasi numerik tanpa eksperimen langsung, dengan lokasi penelitian ditetapkan secara konseptual pada PLTMH PT XYZ sebagai studi kasus. Waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Agustus–September 2025. Alat yang digunakan meliputi laptop/PC berspesifikasi tinggi (Intel i7/AMD Ryzen 7, RAM 16 GB, GPU RTX/AMD setara), perangkat lunak Solidworks 2022 untuk desain 3D, ANSYS Fluent 2025 R1 untuk simulasi CFD, dan Microsoft Excel untuk pengolahan data

hasil simulasi. Bahan penelitian terdiri dari geometri runner turbin crossflow dengan variasi jumlah sudu (18, 24, dan 32), serta parameter debit, head, dan kondisi operasi PLTMH PT XYZ yang diasumsikan konstan sepanjang penelitian.

Desain geometri turbin crossflow dengan variasi jumlah sudu 18, 24, dan 32 dibuat menggunakan perangkat lunak Solidworks, dengan penyesuaian dimensi runner (diameter, panjang, dan sudu) berdasarkan kapasitas PLTMH PT XYZ. Setelah desain selesai, geometri turbin dibagi menjadi dua domain utama, yaitu domain fluida dan domain padatan, untuk mempermudah proses simulasi dan analisis aliran menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD). Proses meshing dilakukan dengan variasi jumlah elemen guna melakukan uji mesh independence, sehingga hasil simulasi yang diperoleh memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Dalam tahap pengumpulan data, digunakan metode eksperimen berbasis simulasi dengan melakukan pengujian pada turbin crossflow dengan variasi jumlah sudu untuk memperoleh data torsi, daya efektif, dan efisiensi. Data hasil simulasi kemudian dianalisis untuk menentukan pengaruh jumlah sudu terhadap performa turbin. Tahapan awal dalam penelitian ini adalah studi literatur, yaitu mengumpulkan berbagai sumber referensi yang berkaitan dengan desain dan kinerja turbin crossflow. Studi ini mencakup kajian mengenai parameter-parameter yang memengaruhi efisiensi kecepatan serta hukum-hukum gaya yang bekerja pada sudu turbin. Dari hasil kajian tersebut, diperoleh dasar teoritis yang digunakan

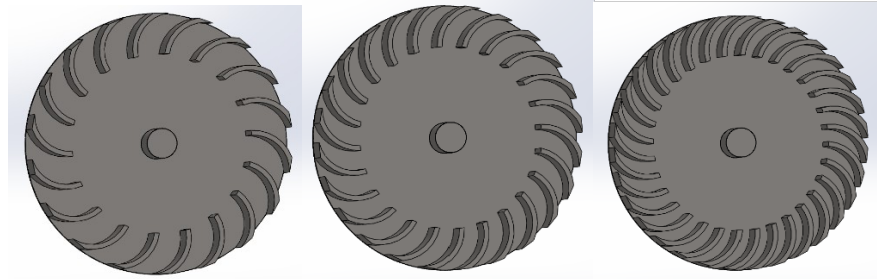
untuk merancang geometri turbin dan menentukan parameter simulasi, seperti head (0,3 m), diameter luar runner (435 mm), diameter dalam runner (280 mm), sudut sudu (18°), debit ($0,03678 \text{ m}^3/\text{s}$), dan kecepatan putar (1500 rpm). Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai acuan dalam simulasi numerik untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah sudu terhadap performa turbin crossflow.

Tahap berikutnya adalah simulasi desain turbin crossflow menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent 2025 R1. Proses simulasi terdiri dari beberapa langkah utama, yaitu preprocessing, processing, dan post-processing. Pada tahap preprocessing dilakukan impor geometri dari Solidworks 2022, pembuatan domain fluida, dan proses meshing untuk membagi geometri menjadi elemen-elemen kecil yang akan dihitung secara numerik. Tahap processing mencakup pengaturan parameter simulasi seperti pemilihan model aliran turbulen (k- ω), penentuan material (air dan besi), kondisi batas (inlet, outlet, dan wall), serta reference values yang diperlukan untuk perhitungan. Setelah itu dilakukan proses perhitungan (run calculation) hingga hasil konvergen, dilanjutkan dengan post-processing untuk memvisualisasikan hasil berupa kontur kecepatan, tekanan, dan torsi turbin. Validasi hasil dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data referensi dari PT XYZ, serta dilakukan grid independency analysis untuk memastikan hasil simulasi tidak bergantung pada jumlah mesh yang digunakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

1. Desain *blade* turbin

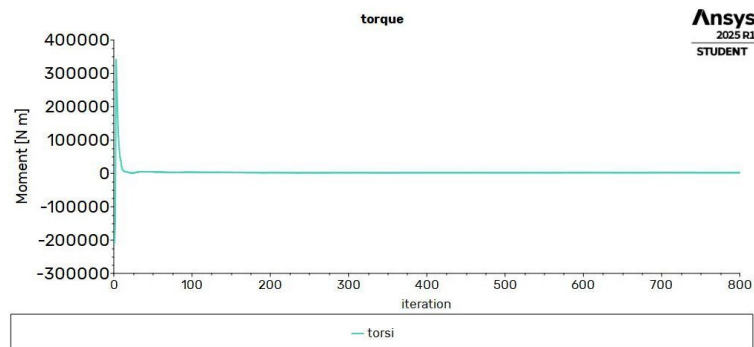


Gambar 4.1 Desain Blade Turbin dengan variasi jumlah sudu

2. Hasil Simulasi

Setelah dilakukan tahap *solution* menggunakan Ansys Fluent versi 2025 R1 pada desain sudu turbin crossflow, diperoleh hasil simulasi berupa nilai torsi terhadap variasi jumlah sudu

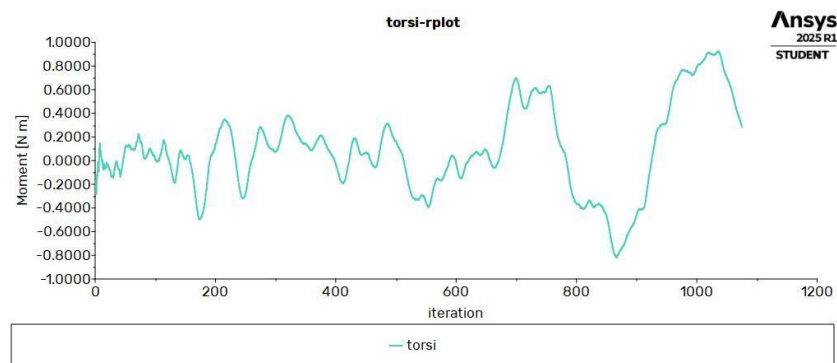
sebanyak 18, 24, 30, dan 32 sudu. Hasil simulasi tersebut disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.2, 4.3, 4.4, dan 4.5.



Gambar 4.2 Torsi sudu 18

Pada Gambar 4.2, ditampilkan hasil simulasi torsi untuk jumlah sudu 18, yang berhasil mencapai konvergensi dengan kriteria residual pada iterasi ke 5985.93s dan waktu

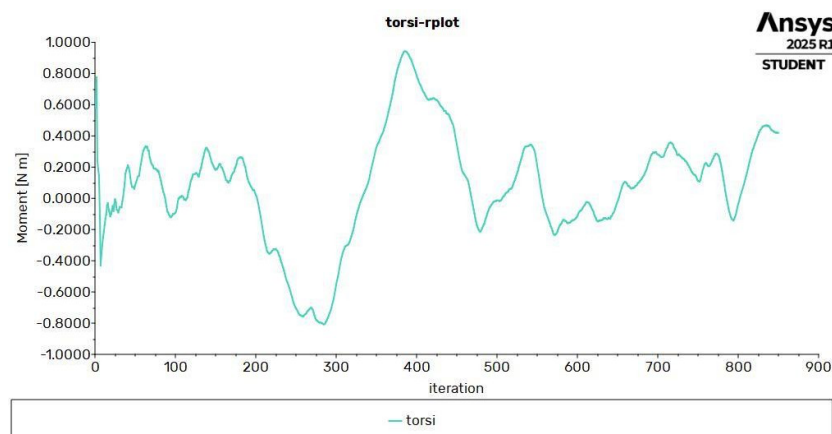
komputasi 1 jam 5 menit. Nilai torsi maksimum yang diperoleh sebesar 21,38806 Nm, dengan kecepatan sudu 157,08 rad/s atau 1500 rpm, daya efektif sebesar 3359,64 W, daya potensial 108,06 W, dan efisiensi 31,09 %.



Gambar 4.3 Torsi sudu 24

Selanjutnya, Gambar 4.3 menunjukkan hasil simulasi untuk jumlah sudu 24, yang mencapai konvergensi pada iterasi ke 2327.44 s dan waktu komputasi 1 jam 7 menit. %.

Nilai torsi yang diperoleh sebesar 4,16108 Nm, dengan daya efektif 653,62 W, daya potensial 108,06 W, serta efisiensi 6,05



Gambar 4.3 Torsi sudu 32

Nilai torsi hasil simulasi dari dan 32 tersebut dapat dilihat secara keempat variasi jumlah sudu 18, 24, 30, lengkap pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Nilai Torsi dan Instrumen Penelitian

o.	Jumlah Sudu	Torsi (Nm)	Kecepatan Sudu (rad/s)	Putaran Turbin (rpm)
	18	21,38806	157,08	1500
	24	4,16108	157,08	1500
	30	9,81303	157,08	1500
	32	4,20016	157,08	1500

Berdasarkan hasil pengujian variasi jumlah sudu pada turbin crossflow, diperoleh data sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.X. Nilai torsi

tertinggi diperoleh pada jumlah sudu 18, yaitu sebesar 21,38806 Nm, dengan daya efektif sebesar 3359,64 W dan efisiensi tertinggi sebesar 31,09%.

Hal ini menunjukkan bahwa semakin sedikit jumlah sudu pada runner, maka torsi yang dihasilkan cenderung meningkat karena aliran fluida dapat masuk dan keluar dengan lebih bebas tanpa banyak hambatan.

Pada variasi jumlah sudu 24, 30, dan 32, terjadi penurunan nilai torsi dan efisiensi secara signifikan. Torsi terendah terdapat pada jumlah sudu 24, yaitu hanya 4,16108 Nm dengan efisiensi 6,05%, sedangkan pada jumlah sudu 30, nilai efisiensinya meningkat sedikit menjadi 14,25%, namun kembali menurun pada jumlah sudu 32 dengan efisiensi 6,11%. Penurunan efisiensi ini disebabkan oleh meningkatnya rugi-rugi hidrolis akibat bertambahnya jumlah bilah yang menyebabkan turbulensi serta hambatan aliran air pada saluran masuk (inlet) dan keluar (outlet) runner.

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa jumlah sudu optimal

pada turbin crossflow terdapat pada konfigurasi 18 sudu, di mana pola aliran fluida lebih terfokus dan energi kinetik air dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk menghasilkan gaya putar pada poros turbin. Sementara itu, penambahan jumlah sudu justru menurunkan kinerja karena menyebabkan gangguan aliran dan berkurangnya kecepatan tangensial fluida terhadap permukaan bilah.

Perhitungan manual dan pembuktian untuk hasil simulasi CFD:

Jika nilai daya efektif P yang diukur atau dihitung independen (mis. dari dynamometer atau perhitungan langsung), maka $\omega = P/T$. Jika punya torsi T saja dan tidak punya P yang terukur, maka *tidak bisa* menghitung ω tanpa informasi tambahan (mis. rpm yang diukur). Harus memastikan P atau n diukur/ditentukan dari eksperimen bukan diambil dari rujukan eksternal.

Tabel 4.2 Analisis Eksperimen

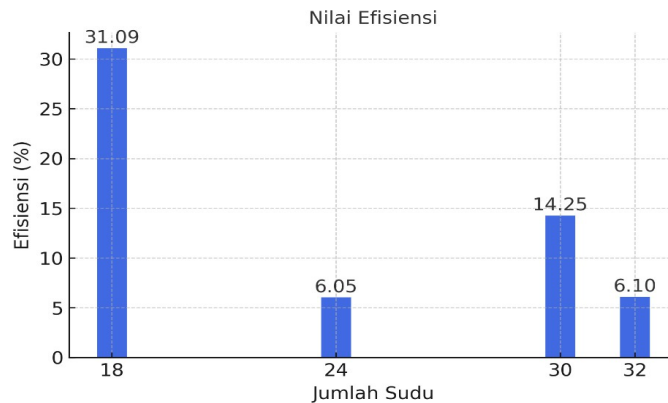
Jumlah sudu	Torsi (T) (Nm)	Daya efektif (P) (W)
18	21,38806	3359,636465
24	4,161084	653,6230747
30	9,813034	1541,431381
32	4,200157	659,7606616

Hasil perhitungan $\omega \approx 157,08$ rad/s dan $n \approx 1500$ rpm sama untuk semua variasi karena pada dasarnya nilai P yang dipakai sudah konsisten dengan nilai ω tersebut (artinya P yang ada awalnya dihitung memakai ω itu).

a. Analisis Torsi

Efisiensi turbin merupakan perbandingan antara daya efektif turbin

terhadap daya potensial fluida yang masuk ke sistem. Nilai efisiensi mencerminkan seberapa besar energi potensial air yang berhasil dikonversi menjadi energi mekanik pada poros turbin. Dalam penelitian ini, faktor utama yang memengaruhi efisiensi adalah variasi jumlah sudu pada runner turbin crossflow.



Gambar 4.4 Data perbandingan nilai torsi

Pada Gambar 4.4 ditampilkan data perbandingan nilai efisiensi turbin crossflow berdasarkan variasi jumlah sudu yaitu 18, 24, 30, dan 32 sudu. Dari gambar tersebut diketahui bahwa efisiensi yang dihasilkan meningkat ketika jumlah sudu lebih sedikit dan menurun ketika jumlah sudu bertambah. Hal ini terjadi karena semakin sedikit jumlah sudu, maka aliran fluida dapat mengalir lebih lancar dan fokus melewati celah antar sudu, sehingga gaya tangensial yang dihasilkan pada permukaan runner menjadi lebih besar. Pada turbin crossflow dengan jumlah 18 sudu diperoleh efisiensi tertinggi sebesar 31,09%, diikuti oleh 30 sudu dengan efisiensi 14,25%, sedangkan pada 24 dan 32 sudu efisiensinya lebih rendah yaitu masing-masing 6,05% dan 6,10%. Penurunan efisiensi ini disebabkan oleh meningkatnya hambatan aliran dan rugi-rugi energi akibat jumlah sudu yang lebih banyak, yang menyebabkan kecepatan tangensial fluida berkurang, pola aliran menjadi lebih turbulen, dan sebagian energi kinetik fluida hilang sebelum mencapai sudu berikutnya. Fenomena ini diperkuat oleh hasil kontur kecepatan (velocity contour) dan kontur tekanan (pressure contour) yang menunjukkan bahwa pada jumlah sudu 18, kecepatan fluida lebih tinggi dan distribusi tekanan lebih merata di sekitar runner, sedangkan pada jumlah

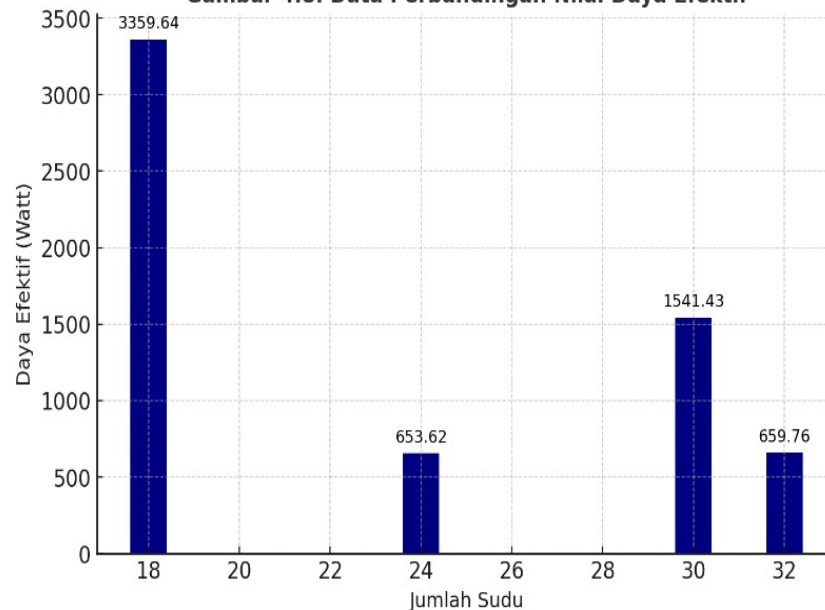
sudu yang lebih banyak, aliran melambat dan terjadi peningkatan area stagnasi di sekitar bilah turbin. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah sudu, efisiensi turbin crossflow akan semakin menurun karena peningkatan jumlah sudu memperbesar gaya hambat fluida dan mengurangi kemampuan turbin dalam mengonversi energi potensial air menjadi energi mekanik secara efisien, sehingga jumlah sudu 18 menjadi konfigurasi paling optimal pada debit 0,03678 m³/s dan head 0,3 m dalam penelitian ini.

b. Daya Efektif Turbin Crossflow dari Variasi Jumlah Sudu

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan daya mekanik turbin $P = 2\pi n \tau P = \frac{2\pi n}{60} \times \tau P = 602\pi n \times \tau$, diperoleh nilai daya efektif turbin crossflow untuk setiap variasi jumlah sudu. Pada jumlah sudu 18, nilai daya efektif sebesar **3359,64 Watt**, yang dihitung dari torsi **21,39 Nm** dan kecepatan putar **1500 rpm**. Untuk jumlah sudu 24, diperoleh daya sebesar **653,62 Watt**, sedangkan pada 30 sudu daya yang dihasilkan mencapai **1541,43 Watt**. Adapun jumlah sudu 32 menghasilkan daya efektif **659,76 Watt**. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa jumlah sudu 18

memberikan hasil daya tertinggi dan efisiensi tertinggi, yaitu 3359,64

Gambar 4.8. Data Perbandingan Nilai Daya Efektif



dibandingkan variasi lainnya.

Dari perhitungan diperoleh daya potensial sebesar **108,06 Watt**. Nilai ini menjadi acuan untuk menentukan efisiensi turbin crossflow pada setiap variasi jumlah sudu, yang menunjukkan seberapa besar energi potensial air berhasil dikonversi menjadi energi mekanik pada poros turbin.

Karena debit dan head dibuat konstan, maka daya potensial pada semua variasi jumlah sudu bernilai sama. Hasil simulasi menunjukkan bahwa daya efektif dan efisiensi turbin crossflow sangat dipengaruhi oleh jumlah sudu yang digunakan. Turbin dengan 18 sudu menghasilkan daya

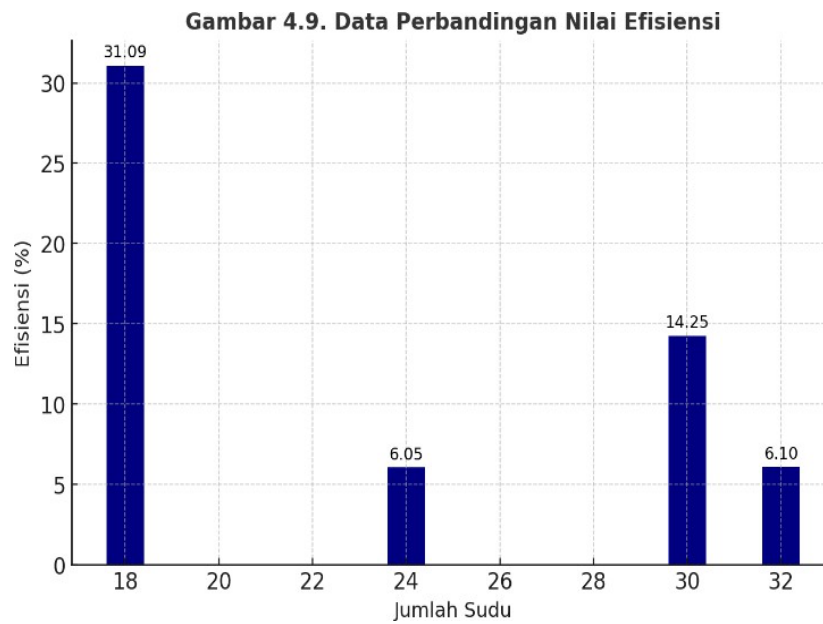
Watt dan 31,09%, sedangkan turbin dengan 24 sudu memiliki nilai terendah, yaitu 653,62 Watt dan 6,05%. Jumlah sudu yang terlalu banyak meningkatkan hambatan fluida (drag) sehingga aliran air kehilangan energi kinetik sebelum sepenuhnya ditransfer menjadi energi mekanik, sedangkan jumlah sudu yang lebih sedikit membuat aliran lebih fokus dan meningkatkan momentum fluida terhadap permukaan sudu, menghasilkan torsi dan daya yang lebih besar.

Nilai perbandingan antara daya efektif dan efisiensi turbin crossflow dari keempat variasi jumlah sudu dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 berikut ini.

Gambar 4.5. Data perbandingan nilai Daya Efektif

Pada Gambar 4.5 ditampilkan perbandingan daya efektif turbin crossflow terhadap jumlah sudu. Terlihat bahwa jumlah sudu 18 menghasilkan daya efektif tertinggi, sedangkan jumlah sudu 24 dan 32 menghasilkan daya terendah.

Peningkatan jumlah sudu cenderung menurunkan kecepatan fluida dan memperbesar rugi energi, sehingga menurunkan kemampuan turbin dalam mengonversi energi potensial air menjadi energi mekanik.



Gambar 4.6. Data perbandingan nilai Efisiensi

Gambar 4.6 menunjukkan hubungan antara jumlah sudu dan efisiensi turbin crossflow. Dari grafik terlihat bahwa jumlah sudu 18 memiliki efisiensi tertinggi sebesar 31,09%, sementara jumlah sudu 24 dan 32 hanya sekitar 6%. Semakin banyak jumlah sudu, aliran fluida di dalam runner menjadi tidak stabil dan kehilangan energi, sehingga efisiensi turbin menurun.

c. Efisiensi Turbin Crossflow dari Variasi Jumlah Sudu

Berdasarkan perhitungan efisiensi diperoleh hasil efisiensi turbin crossflow untuk setiap variasi jumlah sudu. Pada jumlah sudu 18, dengan daya efektif sebesar 3359,64 W dan daya potensial 108,06 W, efisiensi yang dihasilkan mencapai 31,09%, merupakan nilai tertinggi di antara semua variasi. Untuk jumlah sudu 24, daya efektif sebesar 653,62 W menghasilkan efisiensi 6,05%, sedangkan pada 30 sudu efisiensi

meningkat menjadi 14,25% dengan daya efektif 1541,43 W. Adapun pada 32 sudu, efisiensi kembali menurun menjadi 6,11% dengan daya efektif 659,76 W.

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa efisiensi turbin crossflow menurun seiring dengan bertambahnya jumlah sudu. Jumlah sudu 18 memberikan kinerja paling optimal karena mampu memanfaatkan energi potensial air secara lebih efektif untuk menghasilkan torsi dan daya mekanik yang lebih besar. Sementara itu, peningkatan jumlah sudu menyebabkan hambatan fluida meningkat dan transfer energi menjadi kurang efisien. Rangkuman hasil perhitungan daya dan efisiensi dari masing-masing variasi jumlah sudu ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Nilai Daya dan

Efisiensi Turbin Crossflow

Jumlah Sudu	Torsi (Nm)	Daya Efektif (W)	Daya Potensial (W)	Efisiensi (%)
18	21,39	3359,64	108,06	31,09
24	4,16	653,62	108,06	6,05
30	9,81	1541,43	108,15	14,25
32	4,20	659,76	108,06	6,11

3. Analisis Pressure Contour

Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) menggunakan ANSYS Fluent menghasilkan visualisasi *pressure contour* dari empat variasi jumlah sudu pada turbin crossflow, yaitu 18, 24, 30, dan 32 sudu. Gambar kontur tekanan menunjukkan distribusi tekanan fluida terhadap permukaan sudu yang

berperan penting dalam pembentukan gaya puntir (torsi) pada poros runner, di mana nilai dan distribusi tekanan sangat dipengaruhi oleh interaksi fluida dengan permukaan sudu. Berdasarkan hasil simulasi, pada jumlah sudu 18, tekanan fluida terdistribusi lebih merata dan terfokus di area *leading edge* sudu, menghasilkan gaya dorong maksimal dengan torsi tertinggi sebesar 21,39

Nm. Pada jumlah sudu 30, pola tekanan mulai melebar dengan area tekanan tinggi yang berkurang, sedangkan pada 24 dan 32 sudu pola tekanan tampak menyebar tidak merata dan muncul zona tekanan rendah di *trailing edge*, sehingga gaya puntir berkurang dengan torsi hanya sekitar 4,16 Nm dan 4,20 Nm. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin merata dan terfokus distribusi tekanan di sekitar sudu, semakin besar torsi yang dapat dihasilkan oleh turbin crossflow.

4. Analisis Velocity Streamline

Hasil simulasi **CFD** pada turbin crossflow dengan empat variasi jumlah sudu menunjukkan perbedaan signifikan pada pola aliran (*velocity streamline*) yang berpengaruh langsung terhadap besarnya torsi dan efisiensi turbin. Pada jumlah sudu 18, aliran fluida tampak lebih terfokus dan mengikuti profil sudu secara optimal, ditunjukkan oleh jalur *streamline* yang rapat dan minim area *flow separation*. Kondisi ini memungkinkan energi kinetik fluida ditransfer secara efisien ke sudu, menghasilkan torsi maksimum sebesar 21,39 Nm dan efisiensi 31,09%. Ketika jumlah sudu meningkat menjadi 30, pola aliran mulai menyebar dan muncul zona turbulensi di bagian hilir runner, menyebabkan jarak antar *streamline* melebar dan efisiensi transfer energi menurun, dengan torsi berkurang menjadi 9,81 Nm. Pada variasi 24 dan 32 sudu, aliran menjadi semakin tidak terarah dengan area *recirculation* yang luas serta peningkatan turbulensi yang signifikan, mengakibatkan hilangnya energi kinetik fluida sebelum mencapai *trailing edge* sudu dan menghasilkan torsi rendah sekitar 4,16 Nm dan 4,20 Nm dengan efisiensi hanya sekitar

6%. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa jumlah sudu yang terlalu banyak dapat meningkatkan rugi-rugi energi, sedangkan konfigurasi 18 sudu merupakan jumlah paling optimal untuk menghasilkan aliran yang lancar, torsi besar, dan efisiensi tertinggi pada turbin crossflow.

B. Pembahasan

Torsi merupakan gaya puntir yang dihasilkan oleh poros akibat gaya tangensial dari aliran fluida yang bekerja pada permukaan sudu turbin. Dalam konteks turbin crossflow, besarnya torsi sangat dipengaruhi oleh desain geometri dan jumlah sudu. Semakin optimal interaksi antara aliran fluida dan sudu, semakin besar pula gaya tangensial yang terbentuk sehingga torsi dan daya keluaran meningkat. Berdasarkan hasil penelitian, daya potensial dari sistem turbin crossflow diperoleh sebesar 108,06 W, dengan nilai torsi tertinggi pada jumlah sudu 18 sebesar 21,39 Nm dan efisiensi 31,09%. Nilai torsi menurun signifikan ketika jumlah sudu meningkat menjadi 30 dan 32, masing-masing 9,81 Nm dan 4,20 Nm dengan efisiensi hanya sekitar 14,25% dan 6,10%. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah sudu berpengaruh langsung terhadap performa turbin crossflow, di mana peningkatan jumlah sudu tidak selalu menghasilkan kinerja yang lebih baik. Ketika jumlah sudu terlalu banyak, celah aliran menjadi sempit sehingga fluida mengalami hambatan lebih besar dan turbulensi meningkat. Akibatnya, energi kinetik fluida tidak dapat ditransfer secara optimal ke sudu, yang menyebabkan penurunan gaya tangensial, torsi, dan efisiensi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Kholbika Fitroh (2018) yang menyatakan bahwa perubahan desain sudu, termasuk jumlah dan kemiringannya, sangat memengaruhi torsi dan efisiensi turbin air. Menurut Fitroh, konfigurasi sudu yang terlalu rapat dapat mengubah arah jatuh air dan mengurangi energi efektif yang diterima sudu. Hal serupa juga dijelaskan oleh Sinuraya et al. (2024), bahwa desain sudu yang optimal akan mengarahkan aliran masuk sejajar dengan permukaan sudu, sehingga gaya impuls yang dihasilkan menjadi maksimal. Perbedaan nilai torsi dan efisiensi antara penelitian ini dan studi sebelumnya kemungkinan disebabkan oleh variasi pendekatan desain geometri blade, baik dari segi jumlah, ketebalan, maupun profil. Selain itu, faktor seperti kualitas mesh, pemilihan model turbulensi, serta kondisi batas pada ANSYS Fluent juga berpengaruh besar terhadap akurasi hasil simulasi.

Efisiensi merupakan parameter penting dalam menilai kinerja turbin crossflow karena menunjukkan seberapa besar energi fluida yang berhasil dikonversi menjadi daya mekanik pada poros turbin. Dalam penelitian ini, efisiensi tertinggi dicapai pada jumlah sudu 18 sebesar 31,09%, sedangkan variasi dengan jumlah sudu lebih banyak menghasilkan efisiensi lebih rendah akibat peningkatan gesekan internal dan stagnasi aliran. Hasil simulasi *CFD* melalui *velocity contour* dan *pressure contour* memperkuat fenomena tersebut, di mana pada 18 sudu aliran terlihat terarah dan tekanan maksimum terkonsentrasi di *leading edge*, sedangkan pada 30 dan 32 sudu pola aliran menyebar dan *flow separation* meningkat. Hal ini sesuai

dengan penjelasan Versteeg & Malalasekera (2020) bahwa distribusi tekanan dan kecepatan pada bilah turbin sangat menentukan performa konversi energi. *Streamline* pada variasi jumlah sudu juga menunjukkan hubungan langsung antara pola aliran dan performa turbin, di mana 18 sudu menghasilkan *streamline* yang rapat dan stabil, sementara 32 sudu membentuk area *recirculation* yang luas. Sejalan dengan pendapat Subekti et al. (2023), jumlah sudu yang optimal penting untuk mengontrol pola pusaran dan tekanan tangensial, sehingga dapat disimpulkan bahwa konfigurasi 18 sudu merupakan desain paling efisien dan stabil. Penelitian lanjutan disarankan untuk menganalisis sensitivitas terhadap parameter lain seperti bentuk profil sudu, diameter runner, dan sudut serang fluida guna memperoleh desain turbin crossflow yang lebih optimal.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan ANSYS Fluent, jumlah sudu terbukti berpengaruh signifikan terhadap kinerja turbin crossflow, terutama pada nilai torsi, daya efektif, dan efisiensi. Variasi 18 sudu menghasilkan performa terbaik dengan torsi 21,39 Nm, daya efektif 3359,63 W, dan efisiensi 31,09%, sedangkan peningkatan jumlah sudu menjadi 24 dan 32 justru menurunkan kinerja dengan torsi hanya sekitar 4,16–4,20 Nm dan efisiensi sekitar 6%. Penurunan ini disebabkan oleh meningkatnya hambatan fluida dan turbulensi yang mengurangi transfer energi ke

runner. Hasil kontur kecepatan, tekanan, dan *streamline* menunjukkan bahwa konfigurasi 18 sudu memberikan pola aliran paling stabil dan efisien, sehingga dinyatakan sebagai desain paling optimal pada turbin crossflow.

DAFTAR PUSTAKA

- Teknologi.
- Fahmi. (2025). *[Judul Referensi Tidak Lengkap]*. [Nama Penerbit atau Sumber].
- Harahap, A., Nugroho, B., & Setiawan, D. (2021). *Potensi Energi Terbarukan di Indonesia dan Implementasi PLTMH*. *Jurnal Energi Berkelanjutan*, 15(2), 45-58.
- Hasan, F., Pratama, R., & Nugroho, B. (2022). *Analisis Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Indonesia*. *Journal of Renewable Energy*, 8(3), 101-117.
- Hermawan, A., & Yuliana, S. (2019). *Analisis Efisiensi Turbin Mikrohidro di Wilayah Sumatera Barat*. *Jurnal Teknik Elektro*, 7(1), 55-69.
- International Energy Agency (IEA). (2020). *Renewable Energy Policies in Southeast Asia*. IEA Publications.
- Kementerian ESDM. (2020). *Potensi dan Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Kurniawan, R., & Agung, T. (2021). *Evaluasi Kinerja Turbin Mikrohidro pada PLTMH di Jawa Barat*. *Journal of Hydropower Engineering*, 12(4), 65-80.
- Nugroho, B. (2020). *Peran Energi Terbarukan dalam Pembangunan Industri Berkelanjutan di Indonesia*. *Journal of Energy Economics*, 5(2), 45-60.
- Prasetyo, H., & Wahyudi, A. (2019). *Strategi Pengembangan PLTMH di Wilayah Terpencil*. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 6(1), 33-48.
- Pratama, R., Supriyanto, A., & Yusra, H. (2021). *Optimalisasi Pemanfaatan Energi Biomassa di Indonesia*. *Jurnal Teknologi Energi*, 14(3), 89-102.
- Pratama, R., Nugroho, B., & Hasan, F. (2022). *Efisiensi Energi dalam Industri Semen di Indonesia*. *Journal of Industrial Energy Efficiency*, 9(1), 77-92.
- PT Semen Padang. (2020). *Laporan Tahunan Konsumsi Energi di PT Semen Padang*. PT Semen Padang.
- Rahman, M., & Oktaviani, D. (2020). *Dampak Perubahan Iklim terhadap Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Air di Indonesia*. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 11(2), 32-49.
- Samsudin, R., & Wibowo, T. (2020). *Implementasi dan Tantangan Pengembangan PLTMH di*

- Indonesia. Jurnal Teknik Energi*, 13(2), 71-86.
- Santoso, J., & Wijaya, A. (2020). *Analisis Performa PLTMH di Daerah Terpencil: Studi Kasus di Jawa Tengah*. *Journal of Small Hydro Power*, 7(4), 22-39.
- Setiawan, D., Nugroho, B., & Pratama, R. (2021). *Waste Heat Recovery System dalam Industri Semen sebagai Upaya Efisiensi Energi*. *Jurnal Teknik Industri*, 10(3), 112-127.
- Supriyanto, A., Hasan, F., & Pratama, R. (2019). *Pemanfaatan Mikrohidro sebagai Sumber Energi Terbarukan di Industri Semen: Studi Kasus di PT Semen Padang*. *Renewable Energy Journal*, 6(1), 55-70.
- Sudiarja, H., & Handayani, T. (2022). *Efisiensi Energi melalui Penerapan Waste Heat Recovery di Pabrik Semen*. *Jurnal Teknik Energi*, 15(2), 134-150.
- Suwarman, D., Yusra, H., & Pratama, R. (2022). *Pemanfaatan Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia*. *Journal of Renewable Energy Research*, 8(3), 88-104.
- Sulistiyono, R., & Mahendra, P. (2020). *Fluktuasi Debit Air dan Dampaknya terhadap Produksi Energi PLTMH di Indonesia*. *Jurnal Hidrologi Terapan*, 9(2), 50-64.
- Wijaya, A., & Handayani, T. (2021). *Analisis Efisiensi dan Kinerja Turbin Mikrohidro di Daerah*
- Berhutan Tropis. Jurnal Teknik Energi Baru*, 11(1), 25-42.
- Yusra, H., Pratama, R., & Supriyanto, A. (2020). *Analisis Pengembangan Energi Terbarukan di Indonesia*. *Journal of Energy Sustainability*, 7(1), 100-115