

Investigasi Numerik Efek Jumlah dan Sudut *Blade* terhadap Performa *Turbine Vortex Ultra Low Head*

Ganang Setyawan¹, Muhamad Safi'i², Hisyam Ma'mun³

^{1,2,3}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Informatics, Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang University, Central Java 50232, Indonesia.

Email Penulis Korespondensi: muhamadsafii@upgris.ac.id

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Blade Jumlah Sudut Turbin Vortex	Pertumbuhan kebutuhan energi listrik di wilayah terpencil memungkinkan dibutuhkannya kemandirian energi yang berkelanjutan, dan pengembangan <i>turbine vortex ultra low head</i> sebagai solusi pembangkit listrik skala kecil yang efektif dan efisien serta minim dampak ekologis. Penelitian pada instalasi <i>turbine vortex ultra low head</i> menarik untuk di kaji lebih lanjut, namun kajian simultan pengaruh jumlah dan sudut <i>blade</i> pada <i>runner</i> terhadap performa turbin ini masih terbatas. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya mengkaji jumlah atau sudut <i>blade</i> secara terpisah, <i>novelty</i> penelitian ini terletak pada evaluasi numerik pengaruh kombinasi jumlah dan sudut <i>blade</i> secara simultan terhadap performa <i>turbine vortex ultra low head</i>. Studi numerik efek jumlah dan sudut <i>blade</i> pada <i>runner</i> terhadap performa <i>turbine vortex ultra-low head</i> di usulkan dalam riset ini dengan menggunakan perangkat komputer <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD) dengan menerapkan model turbulensi <i>Standard k-omega</i> pada kondisi <i>steady state</i>. Variasi jumlah <i>blade</i> (4, 6, dan 8) serta sudut <i>blade</i> (0°, 7,5°, dan 12,5°) diusulkan dalam riset ini. Konfigurasi 4 <i>blade</i> sudut 0° menghasilkan efisiensi 13,15% dikecepatan aliran 36,63 m/s, sedangkan konfigurasi 8 <i>blade</i> sudut 12,5° pada kecepatan aliran yang sama menghasilkan efisiensi 31,91%, atau meningkat sebesar 18,76 poin persentase dibandingkan konfigurasi 4 <i>blade</i> sudut 0°. Disimpulkan konfigurasi <i>runner</i> paling optimal pada <i>turbine vortex low head</i> adalah konfigurasi 8 <i>blade</i> sudut 12,5°, sehingga model simulasi yang diperoleh dapat dijadikan acuan pengembangan studi numerik <i>turbine vortex ultra low head</i> selanjutnya.
	Abstract
Keywords: Angle Blade Pics Turbine Vortex	The growing demand for electricity in remote areas necessitates sustainable energy self sufficiency, positioning the development of ultra-low-head vortex turbines as an effective, efficient, and ecologically low-impact solution for small-scale power generation. While research into ultra-low-head vortex turbine installations warrants further exploration, simultaneous studies on how the number and angle of runner blades affect turbine performance remain limited. Unlike previous studies that typically examined blade count or blade angle in isolation, the novelty of this research lies in the numerical evaluation of the combined, simultaneous effect of these parameters on turbine performance. This study proposes a numerical analysis of the effects of runner blade count and angle on ultra low head vortex turbine performance using Computational Fluid Dynamics (CFD) software, applying the standard k-omega turbulence model under steady state conditions. Variations in blade count (4, 6, and 8) and blade angle (0°, 7.5°, and 12.5°) were investigated. The 4 blade, 0° angle configuration yielded an efficiency of 13.15% at a flow velocity of 36.63 m/s, whereas the 8 blade, 12.5° angle configuration achieved an efficiency of 31.91% at the same velocity increase of 18.76 percentage points. The study concludes that the 8-blade, 12.5° angle configuration is the most optimal runner setup; consequently, the resulting simulation model can serve as a reference for future numerical studies on ultra-low-head vortex turbines.
	<i>JuKSIT</i> is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
	

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan permintaan listrik global yang pesat serta dampak lingkungan dari pembangkit berbasis bahan bakar fosil menuntut percepatan pengembangan sistem energi terbarukan berskala kecil yang kompak, efisien, dan andal [1]. Untuk wilayah terpencil, pemanfaatan potensi hidrokinetik melalui teknologi *pico-hydropower* menjadi solusi desentralisasi energi yang potensial karena meminimalkan gangguan ekologis dibandingkan bendungan besar [2]. namun

banyak aliran sungai memiliki karakteristik *ultra-low head* atau bahkan *zero-head* yang membuat turbin konvensional tidak dapat beroperasi secara ekonomis [3]. Sebagai solusinya, *gravitational water vortex turbine* dikembangkan karena mampu mengonversi energi aliran secara optimal pada kondisi *head* sangat rendah [2]. Dengan prinsip kerja mengandalkan pembentukan pusaran air (*vortex*) di dalam *basin*, dimana fluida mengalami peningkatan kecepatan tangensial di dekat inti udara sebelum keluar melalui *outlet* [4]. Karakteristik aliran ini sangat dipengaruhi oleh geometri *basin*; *basin conical* menghasilkan konsentrasi gaya *vortex* yang lebih kuat, terfokus, dan stabil pada poros pusat dibandingkan tipe silinder maupun konikal konveks [5]. Selain bentuk *basin*, parameter mekanis rotor juga krusial dalam transfer momentum fluida ke sistem mekanik [6]. serupa dengan ekstraksi momentum pada turbin arus pasang surut maupun turbin angin, dimana variasi jumlah, bentuk, dan orientasi sudu menentukan kestabilan hidrodinamis, torsi, serta efisiensi daya maksimum [1], [6], [7]. rekayasa sudu berbasis biomimetik rumah keong (*snail shell*) terbukti meningkatkan efisiensi turbin hingga 33,01% dibandingkan sudu datar konvensional [6].

Penelitian mengenai *vortex* dan aplikasinya pada pembangkit energi terbarukan berkembang dari kajian dasar mekanika fluida hingga optimasi desain turbin. [8] melalui pengujian sistem V3V pada sump pompa menemukan bahwa energi kinetik turbulen *vortex* berpasir meningkat pada tahap awal, mencapai maksimum, bertahan sekitar 0,4 detik, lalu menurun tajam dan hilang dalam 0,3 detik, dengan kecepatan perkembangan aksial *vortex* berkaitan erat dengan jarak terhadap impeller pompa memberikan dasar pemahaman perilaku aliran berputar yang relevan bagi kerja turbin *vortex ultra low head*. Pada aspek desain *inlet* dan *basin* [9] melalui desain faktorial 3^2 , CFD, dan RSM memperoleh konfigurasi optimal *inlet spiral Nazca* ($N = 4$, $\theta = 13^\circ$) dengan sirkulasi *vortex* (Γ) = 1,3459 m²/s, setara nilai pada *inlet wrap-around* konvensional yang telah dioptimasi. [10] menegaskan bahwa semakin kecil rasio diameter *basin* (d/D), semakin tinggi *vortex* yang terbentuk, namun kecepatan tangensial dan kekuatan *vortex* menurun karena *head* kinetik berubah menjadi *head* potensial [11], melalui simulasi CFD dengan variasi *inlet* (180 – 220 mm) dan *outlet* (120 – 140 mm) membuktikan *basin* kerucut menghasilkan *vortex* lebih kuat dibanding *basin* silinder. Pada aspek rotor dan sudu, [12] menemukan torsi dan daya meningkat hampir linear pada laju besar seiring peningkatan kecepatan putar (40 – 120 Rpm) untuk kombinasi bentuk bilah dan diameter *orifice* tertentu. [13] pada debit 0,006 m³/s dan *head* 0,43 m menemukan sudu 60° menghasilkan daya-efisiensi tertinggi (7,21 Watt; 28,47% pada 80 Rpm), disusul sudu 80° (6,43 Watt; 25,41% pada 70 Rpm), dengan sudu 40° terendah. [14] menunjukkan sudu pipa belah tiga sudut 0° pada 65,7 Rpm hanya mencapai efisiensi 9,094%, sedangkan sudut kemiringan 45° pada 75,8 Rpm meningkatkannya menjadi 11,755%. Pendekatan optimasi terintegrasi ditunjukkan [15] yang memadukan pemodelan *velocity triangle theory*, CFD multi-turbulensi, dan validasi eksperimental (memperhitungkan gesekan bantalan), menghasilkan kesesuaian kuat antara simulasi dan data empiris. [16] memadukan FEA dan eksperimen untuk mengevaluasi hubungan laju aliran-torsi-efisiensi, membuktikan kelayakan GWVP untuk badan air kecil. Di luar konteks *vortex*, [17] pada sistem pompa *box culvert* Sungai Yangtze menunjukkan efisiensi maksimum 68,0% dicapai pada sudut bilah 2°, dengan margin kavitas kritis menurun-lalu-meningkat seiring penurunan head, dan kecepatan runaway meningkat seiring penurunan sudut bilah. Secara keseluruhan, seluruh kajian menegaskan bahwa performa sistem berbasis *vortex* sangat bergantung pada interaksi geometri komponen (*basin*, *inlet*, sudu, sudut pemasangan) dengan kondisi operasional aliran, sehingga optimasi multiparameter melalui kombinasi eksperimental dan numerik menjadi metode dominan dalam penelitian terkini.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh geometri sudu terhadap performa turbin *vortex ultra-low head*, namun umumnya masih terbatas pada variasi satu parameter saja. [13] menggunakan *runner* sudu *semi-twisted curve* dan mencatat performa tertinggi pada sudut sudu 60° (daya 7,21 Watt, efisiensi 28,47% pada 80 Rpm), disusul sudut 80° (daya 6,43 Watt, efisiensi 25,41% pada 70 rpm), sementara kinerja terendah dijumpai pada konfigurasi sudu lainnya. [18] menganalisis pengaruh sudut kemiringan *bottom blade* (22,5°, 32°, 42°) terhadap torsi turbin *vortex* menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan jumlah sudu tetap (lima sudu), namun hanya mengevaluasi torsi tanpa daya maupun efisiensi. [19] memfokuskan variasi pada sudut *notch* saluran masuk (7° – 15°) dan menemukan efisiensi yang masih rendah (2,69% – 6,11%), sementara [20] mengkaji sudut *impact angle runner* (0° – 40°) pada *basin* konikal dan memvalidasinya secara eksperimental, tanpa memvariasikan jumlah sudu. [21] menggabungkan variasi jumlah sudu, panjang sudu, sudut masuk, dan sudut keluar menggunakan metode Taguchi L9, dan menemukan bahwa panjang sudu serta sudut keluar merupakan faktor paling dominan terhadap torsi dan efisiensi turbin. Namun, penelitian tersebut masih menggunakan pendekatan *steady* RANS pada satu titik operasi ($Q = 0,6$ m³/s; $H = 0,86$ m) sehingga belum merepresentasikan kondisi *ultra-low head* secara spesifik, dan desain Taguchi L9 tidak mengungkap interaksi antarparameter secara menyeluruh. Sejalan dengan hal ini, [22] menekankan bahwa studi parametrik komponen turbin *vortex* termasuk jumlah dan geometri sudu masih dilakukan pada rentang nilai terbatas dan spesifik terhadap satu konfigurasi sistem, sehingga hasilnya sulit digeneralisasi maupun dibandingkan antarpemelitian.

Dari fenomena umum kebutuhan energi terbarukan skala kecil hingga tinjauan spesifik atas desain sudu turbin *vortex ultra-low head* yang telah diuraikan, dapat diidentifikasi bahwa penelitian-penelitian terdahulu umumnya masih terbatas pada variasi satu parameter geometri sudu (jumlah sudu, sudut sudu, atau sudut kemiringan) secara terpisah, sehingga interaksi antara jumlah dan sudut *blade* terhadap performa turbin belum terungkap secara menyeluruh.

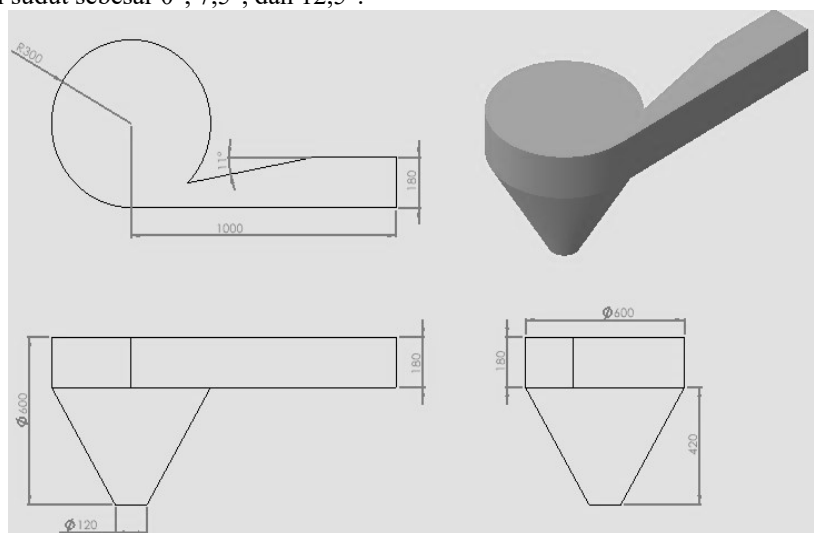
Kesenjangan ini belum terpecahkan karena sebagian besar studi terdahulu menggunakan pendekatan satu titik operasi atau desain eksperimen yang tidak mencakup kombinasi kedua parameter tersebut secara simultan pada kondisi *ultra-low head*. Dalam penelitian ini simulasi numerik dilakukan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan model turbulensi *Standard k- ω* . Studi ini bertujuan menganalisis karakteristik aliran, turbulensi, dan distribusi gaya pada turbin guna memperoleh desain *blade* paling optimal serta mengkaji kinerja *runner* turbin. Penelitian ini mengatasi kesenjangan tersebut dengan mengevaluasi secara numerik pengaruh kombinasi jumlah *blade* (4, 6, dan 8) dan sudut *blade* (0° , $7,5^\circ$, dan $12,5^\circ$) secara simultan terhadap performa *turbine vortex ultra-low head* menggunakan simulasi CFD. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada evaluasi numerik pengaruh kombinasi variasi jumlah dan sudut *blade* pada kondisi *ultra-low head* menggunakan CFD, yang belum pernah dilaporkan pada penelitian-penelitian sebelumnya, sehingga hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah baru dalam pengembangan desain *runner turbine vortex ultra-low head* yang lebih optimal.

2. METODOLOGI PENELITIAN

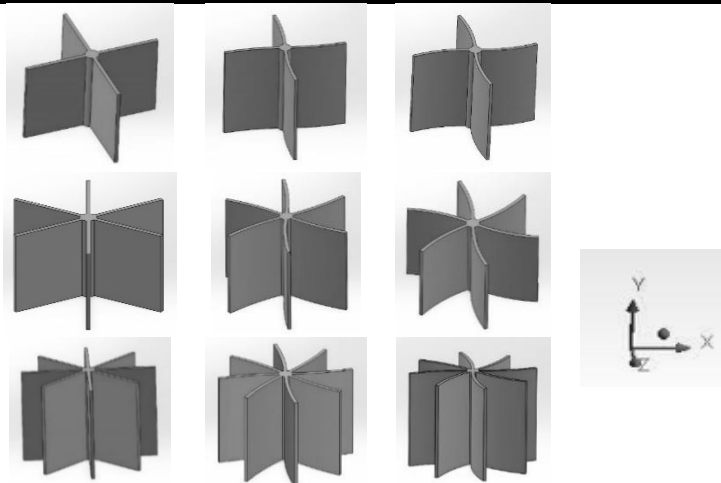
Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh sudut tumbukan *runner* terhadap kinerja turbin *vortex* menggunakan variasi jumlah *blade* (4, 6, dan 8) dan sudut tumbukan (0° , $7,5^\circ$, dan $12,5^\circ$) dengan variasi laju kecepatan /*velocity magnitude* yang dialirkan pada *inlet* (23,13 m/s, 26,37 m/s, 33,6 m/s, dan 36,64 m/s). Pendekatan penelitian menggabungkan metode simulasi numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan uji eksperimental. Pekerjaan eksperimental ini bertujuan untuk menyelidiki karakteristik unjuk kerja *runner*, sekaligus memvalidasi hasil dari studi simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Pengujian eksperimental secara spesifik difokuskan pada kondisi sudut tumbukan *runner* yang menghasilkan kinerja paling optimal berdasarkan data simulasi. Pemilihan model turbulensi *k- ω Standard* pada penelitian ini didasarkan pada kemampuannya memberikan keseimbangan antara akurasi prediksi aliran dekat dinding (*near-wall*) pada *domain basin* dan *runner* serta efisiensi komputasi dibandingkan model turbulensi lain. Kondisi aliran *steady* dengan model turbulensi *k- ω Standard* dan metode algoritma pemecahan perhitungan *coupled* dipilih saat *set up* simulasi dengan pertimbangan studi yang dilakukan pada bilangan *Reynolds* yang tinggi, dan berdasarkan studi literatur yang menyatakan bahwa model turbulensi *k- ω Standard* dan metode algoritma pemecahan perhitungan (*coupled*) cocok digunakan untuk kasus ini.

2.1. Model Desain

Gambar 1 menampilkan *turbine* reaksi *vortex ultra-low head* tampak atas, samping, depan, dan geometri 3D yang didesain menggunakan perangkat lunak SolidWorks dengan mengacu pada geometri dari literatur [23]. Pada penelitian ini, desain *turbine* reaksi *vortex ultra-low head* terdiri atas geometri *basin* dan *blade*. Variasi yang diusulkan dalam penelitian ini yaitu geometri saluran *basin* dengan ukuran *inlet* 180 mm dan *outlet* 120 mm. Sementara itu, Gambar 2 menampilkan geometri 3D *blade* dengan diameter *shaft* (r) 10 mm, diameter putar *blade* (r) 100 mm, tebal 5 mm, tinggi 120 mm, serta variasi sudut sebesar 0° , $7,5^\circ$, dan $12,5^\circ$.



Gambar 1. Geometri Turbin Reaksi *Vortex Ultra-Low Head* Tampak Atas, Samping, Depan, dan 3D



Gambar 2. Variasi Sudut Lengkung dan Jumlah Turbin.

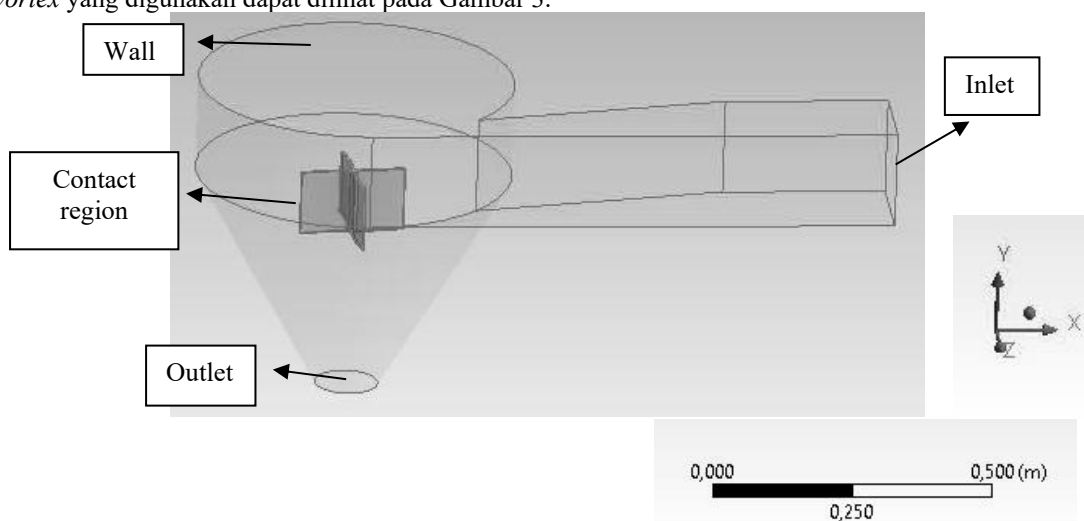
2.2. Material

Dalam studi numerik ini, komponen modul turbin terbuat dari paduan baja ST 60 yang diasumsikan memiliki konduktivitas termal sebesar 17 W/m.K. Dan air dipilih untuk fluida kerja karena karakteristiknya pada suhu 25°C, yaitu densitas 998 kg/m³, kalor spesifik 4.182 J/kg.K, viskositas dinamik $1,915 \times 10^{-5}$ kg/m.s, dan konduktivitas termal 0,6 W/m.K, sesuai dengan kondisi operasional yang ditinjau. Di *input* Parameter tersebut berdasarkan database menu *set up* dalam program *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

2.3. Studi Numerik

a. Domain Komputasi

Alur penelitian secara terperinci disajikan pada Gambar 3. Prinsip kerja sistem ini dimulai saat fluida air (H₂O) mengalir masuk melalui saluran *inlet*, kemudian menuju bak penampung (*basin*). Air yang masuk ke dalam *basin* akan membentuk aliran pusaran (*vortex*) yang kemudian memutar *runner* turbin hingga menghasilkan momen (torsi). Setelah melewati proses tersebut, aliran *vortex* akan keluar melalui saluran *outlet* pada *basin*. Detail desain dari *runner* turbin *vortex* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.



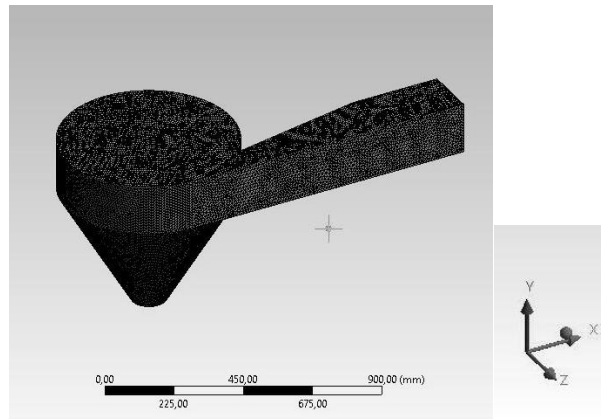
Gambar 3. Pemodelan Komputasi dan Penetapan Kondisi Batas Pada Turbin Reaksi *Vortex Ultra-Low Head*.

Domain komputasi dalam penelitian ini didiskritkan menggunakan metode volume kontrol berbasis skema *first-order upwind* untuk mengoptimalkan stabilitas konvergensi solusi. Geometri domain dimodelkan menggunakan *Design Modeller* pada *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan mempertimbangkan interaksi material fluida dan padat, sebagaimana disajikan pada Gambar 3. Penentuan kondisi batas didasarkan pada analisis aliran fase tunggal dalam kondisi

tunak (*steady state*). Domain ini diintegrasikan ke dalam sistem koordinat Kartesius, di mana sumbu X, Y, dan Z masing-masing merepresentasikan arah aliran utama (*streamwise*), transversal (*spanwise*), dan normal terhadap bidang XY. Komponen utama domain ini dibagi menjadi empat wilayah kritis: daerah inlet yang dirancang agar aliran berkembang penuh (*fully developed flow*), daerah *outlet* sebagai saluran pembuangan fluida, daerah wall basin yang membagi bidang geometri secara simetris di setiap sisi, serta *contact region* yang memfasilitasi interaksi tegangan permukaan antara fluida air dan bilah (*blade*) turbin. Konfigurasi struktural ini diterapkan untuk menjamin optimalisasi simulasi dan akurasi analisis performa turbin. Domain komputasi ditetapkan berupa saluran berpenampang persegi dengan dimensi 180 mm x 180 mm dan panjang 1000 mm, dilengkapi takik saluran sepanjang 480 mm dengan sudut takik sebesar 11°, serta lebar pada saluran keluar sebesar 57 mm. *Basin* dirancang berbentuk kerucut memakai diameter bagian atas 600 mm dan bawah 120 mm, tinggi pada *basin* 600 mm, dan sudut kerucut sebesar 23°. *Runner turbine vortex* diposisikan pada jarak 12/60 bagian atas *basin*.

b. Mesh

Proses pembuatan *mesh* dilakukan dengan mempertimbangkan jenis topologi *automatic (tetrahedral)* dan ukuran *sizing cell* sebesar 1 mm pada bagian *blade* turbin dan 2 mm pada bagian *basin*, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Tahapan *meshing* ini bertujuan untuk membagi domain simulasi menjadi elemen-elemen kecil sehingga perhitungan numerik dapat dilakukan secara lebih akurat, sehingga mampu menangkap perubahan aliran pada area *inlet*, *outlet*, *basin* (*wall*), dan *contact region* (*runner*) dengan lebih baik. Kualitas *mesh* dievaluasi menggunakan parameter *Orthogonal Quality* melalui fitur *Mesh Metrics*. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sebagian besar elemen memiliki nilai *Orthogonal Quality* dengan nilai 0,99996 (*very good*) dan nilai *mesh metric skewness* sebesar 0,9911 (*very good*), dan nilai $y^+ = 1$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *mesh* yang digunakan memiliki kualitas yang sangat baik sehingga mampu menghasilkan solusi numerik yang stabil dan representatif. Untuk menyelesaikan persamaan atur, digunakan teknik volume kontrol dengan skema diskritisasi *first-order upwind* yang menawarkan komputasi relatif cepat. Domain diisi oleh *grid tetrahedral* dengan resolusi tinggi di sekitar dinding guna menangkap efek lapisan batas hidrolik secara optimal [24][25].



Gambar 4. Struktur Mesh Tetrahedral.

Mesh dianggap sudah baik apabila nilai *Orthogonal quality* > 0,1, *Max skewness* < 0,95, dan *Wall* $y^+ = 1$ [26]. Persamaan atur (*governing equations*) *turbine* reaksi *vortex ultra-low head* pada domain komputasi 3D ini mengadopsi sistem koordinat Kartesius yang terdiri atas persamaan kontinuitas dan persamaan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS). Sistem persamaan tersebut diselesaikan menggunakan model *viskos k- ω Standard*. Model ini dipilih karena kemampuannya dalam menyelesaikan persamaan numerik secara cepat dan akurat, dimana tingkat presisi hasil akhir akan sangat bergantung pada asumsi pemodelan *viskositas* yang diterapkan. Persamaan kontinuitas rata-rata *Reynolds* dan persamaan *Navier-Stokes* disajikan menggunakan notasi tensor yaitu:

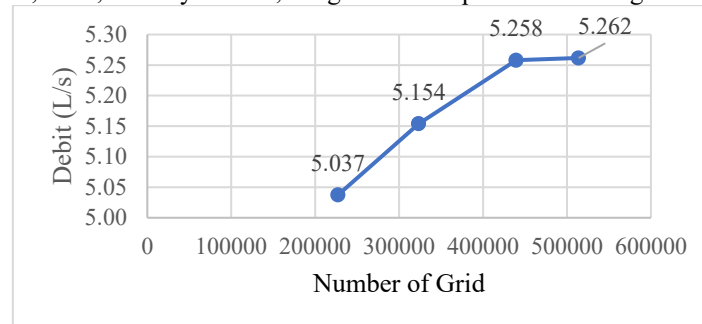
Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \alpha_k \rho_k v_k = \Gamma_k \quad (1)$$

Persamaan momentum:

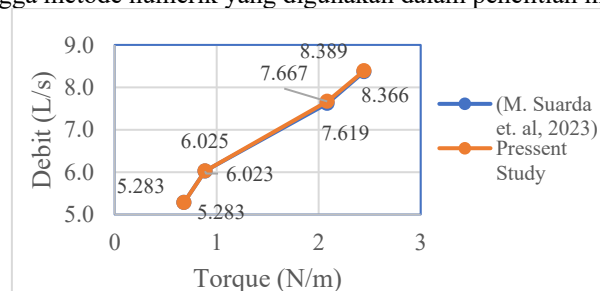
$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k v_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k v_k v_k) = (\alpha_k \rho_k \nabla \cdot [\alpha_k (T_k + T_{Tk} + T_{Dk})] + \alpha_k \rho_k f_k + M_k) \quad (2)$$

Grid independensi dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak terpengaruh oleh ukuran atau jumlah elemen *mesh* pada domain komputasi. Pengujian ini membandingkan empat variasi jumlah elemen *mesh*, yaitu 227.187; 323.366; 439.499; dan 513.810 elemen, guna menemukan titik optimal antara akurasi data simulasi (seperti debit turbin) dan efisiensi waktu komputasi. Prosedur simulasi disusun secara bertahap berdasarkan skema eksperimen yang relevan. Setiap konfigurasi *mesh* dievaluasi untuk memastikan bahwa penambahan jumlah elemen tidak lagi memberikan perubahan signifikan pada parameter utama, termasuk debit turbin, tekanan, kecepatan, dan turbulensi aliran. Langkah ini krusial untuk meminimalkan biaya komputasi dengan menghindari penggunaan *mesh* yang terlalu rapat tanpa adanya peningkatan akurasi yang berarti. Tahapan simulasi ini meliputi pemodelan domain komputasi, penentuan kondisi batas, penerapan model turbulensi, hingga proses iterasi. Melalui analisis komparatif ini, *mesh* optimal dapat ditentukan sehingga hasil simulasi terbukti valid dan andal (*reliable*) dalam menganalisis performa turbin *vortex ultra-low head*. Hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk grafik pengaruh antara jumlah *grid* dengan nilai debit, sebagaimana disajikan di gambar 5. Kesalahan relatif yang diperoleh adalah $\pm 0,9\%$ (*grid* 227.187 – 323.366), $\pm 0,4\%$ (*grid* 323.366 – 439.499), dan $\pm 0,2\%$ (*grid* 439.499 – 513.810), menunjukkan hasil simulasi telah konvergen. Jumlah *grid* 513.810 ditetapkan sebagai konfigurasi optimum karena penambahan *grid* pada tahap ini hanya mengubah nilai debit secara marginal (5,25 L/s menjadi 5,26 L/s), sehingga digunakan sebagai acuan pengambilan data pada simulasi *turbine* reaksi *vortex ultra-low head* untuk seluruh variasi yang diusulkan. Parameter yang dibandingkan pada setiap jumlah elemen *mesh* meliputi debit aliran, torsi, kecepatan aliran, *head*, dan daya turbin, dengan nilai eksperimental sebagai acuan.

Gambar 5. Jumlah *Grid* Terhadap Debit.

c. Uji validasi

Untuk memastikan validitas metode dan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD,) dilakukan proses validasi dengan membandingkan hasil pendekatan numerik terhadap data eksperimen *turbine* reaksi *vortex ultra-low head* yang telah dilakukan oleh [23]. Parameter yang menjadi fokus pada penelitian ini yaitu efisiensi turbin, yang digunakan untuk mengevaluasi performa *turbine* reaksi *vortex ultra-low head* yang disarankan. Membandingkan variasi nilai torsi terhadap efisiensi turbin adalah proses validasi yang dilakukan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6 mengenai hubungan antara torsi dan debit. Dari beberapa hasil simulasi yang diperoleh, hanya data dengan tingkat kesesuaian terbaik yang ditampilkan dalam laporan ini. Berdasarkan hasil perbandingan pada berbagai variasi debit, diperoleh kesalahan relatif (*error*) terbesar sebesar 0,05%, yaitu pada debit 7,619 (eksperimen) dan 7,667 (numerik). Sementara itu, kesalahan relatif terkecil sebesar 0% diperoleh pada debit 5,283 (eksperimen) dan 5,283 (numerik). Nilai kesalahan relatif yang kecil pada seluruh variasi debit tersebut menunjukkan bahwa hasil simulasi numerik memiliki kesesuaian yang baik dengan data eksperimen, sehingga metode numerik yang digunakan dalam penelitian ini dapat dinyatakan valid.

Gambar 6. Nilai *Torque* Terhadap Debit.

d. Reduksi data numerik

Pada studi ini, terdapat beberapa parameter data yang harus ditentukan dan dihitung untuk mengevaluasi performa turbin.

1. Debit Aliran (Q)

$$Q = A.V \quad (3)$$

Selain itu, nilai tersebut juga dapat diperoleh melalui model empiris yang mengaitkan diameter, percepatan gravitasi, dan tinggi permukaan air di atas *basin*:

$$D = \left(\frac{Q}{C \cdot \sqrt{2gH}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

2. Energi potensial

Energi potensial per satuan waktu, atau yang disebut daya potensial (P_p), dihitung dengan mempertimbangkan energi potensial gravitasi dari aliran air yang melewati sistem *basin* kerucut *vortex* [23]. Energi potensial gravitasi tersebut dapat dinyatakan dalam rumus berikut:

$$P_p = \rho.Q.g.h \quad (5)$$

3. Daya teoritis Turbin

Daya teoritis mampu dihasilkan pada *basin* kerucut *vortex* dapat ditentukan melalui perhitungan berdasarkan rumus berikut [23]:

$$P = \eta.\rho.Q.g.h \quad (6)$$

4. Volume *Basin* Kerucut

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h \quad (7)$$

5. Daya Turbin

$$P_t = Q.g.H \quad (8)$$

6. Luas Penampang

Untuk menghitung luas penampang pada saluran masuk (*inlet*) pada *basin* berbentuk kerucut, digunakan pendekatan model trapesium. Perhitungan luas penampang tersebut dapat dinyatakan melalui rumus luas trapesium berikut:

$$A = \frac{1}{2} \cdot (a + b) \cdot h \quad (9)$$

7. Force Turbine

$$P = C_p \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (10)$$

8. Efisiensi

$$\eta = \frac{P}{P_t} \times 100\% \quad (11)$$

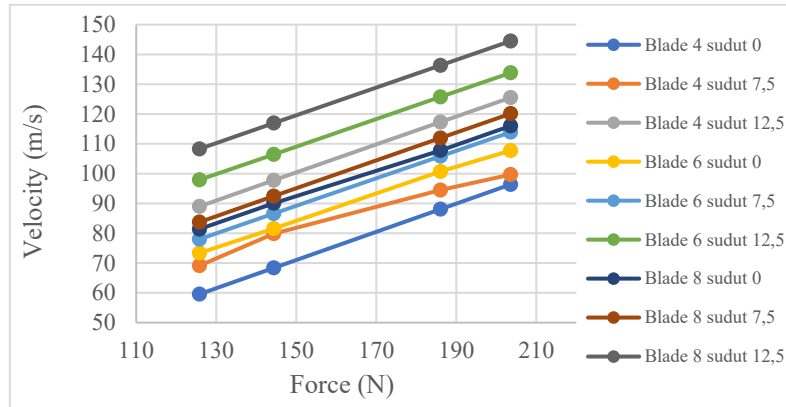
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Aliran Fluida

Turbin aliran aksial merupakan jenis *turbine* yang arah aliran fluidanya sejajar dengan sumbu poros. Prinsip kerja *turbine* terhadap *vortex ultra-low head* diawali dengan masuknya air melewati *inlet* menuju area *volute*. Pada bagian *volute* ini, *blade* berputar akibat gaya dorong yang ditimbulkan oleh aliran air, sehingga terbentuk pusaran (*vortex*) pada fluida. Selanjutnya, fluida dialirkan menuju saluran outlet, dan dari proses tersebut dihasilkan energi mekanik yang dapat dikonversi menjadi energi listrik [25].

Karakteristik aliran pada turbin ini menimbulkan fenomena separasi aliran serta perbedaan tekanan di sekitar permukaan *blade*, yang pada gilirannya menghasilkan gaya drag. Kondisi ini menyebabkan aliran fluida menjadi tidak stabil dan memicu terjadinya turbulensi. Disamping itu, gelombang pusaran air (*vortex*) yang timbul dampak momentum

linear berupa gaya hidrostatik terhadap sudu berbentuk ulir mengakibatkan peningkatan gaya sentrifugal. Peningkatan gaya sentrifugal tersebut memberikan kontribusi positif terhadap besarnya energi yang dapat dimanfaatkan oleh turbin.



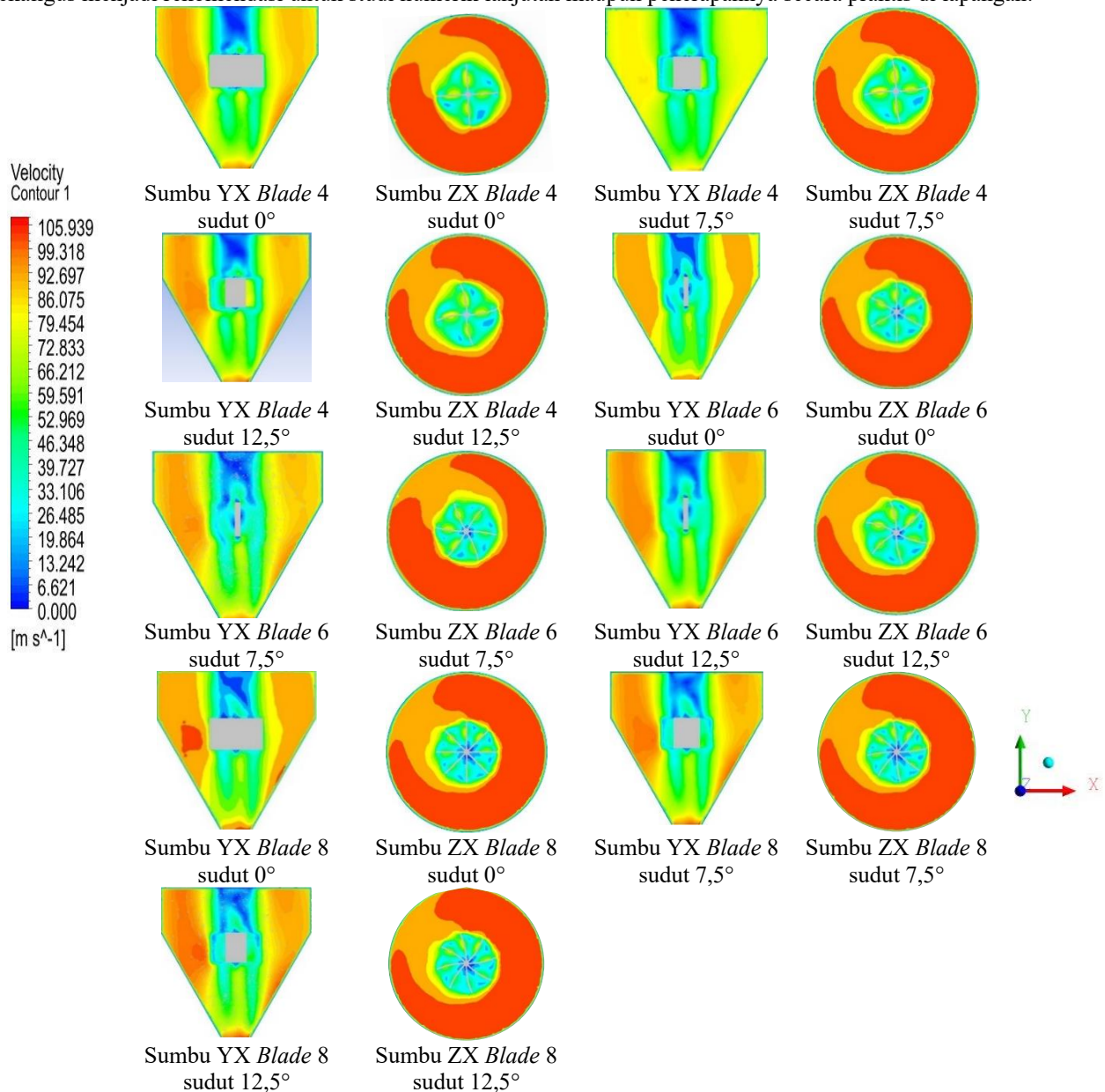
Gambar 7. Nilai Force Terhadap Velocity.

Faktor kedalaman *basin*, sudut kemiringan *shaft*, serta jumlah *blade* turut memegang peranan penting dalam menentukan bentuk aliran fluida yang terjadi. Hasil pengamatan pada studi numerik menunjukkan bahwa aliran fluida yang masuk melalui penampang *inlet* cenderung bersifat laminar juga relatif stabil. Adapun kecepatan absolut yang bekerja pada turbin merupakan kecepatan aliran fluida yang diukur berdasarkan kerangka acuan diam (*stationary frame*). Parameter ini menjadi indikator besarnya energi kinetik yang turut berkontribusi terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin. Dalam studi numerik ini, pengambilan nilai kecepatan aliran maupun distribusi *streamline* pada *turbine* dilakukan dalam kondisi *steady*. Keberadaan kecepatan absolut pada turbin memicu timbulnya gaya tangensial yang muncul akibat momentum putar (torsi) pada sistem turbin, sehingga besarnya gaya (*force*) tersebut dapat diidentifikasi. Nilai *force* ini selanjutnya diharapkan mampu menjadi salah satu parameter dalam mengevaluasi performa dan kinerja turbin secara menyeluruh.

Pengaruh jumlah *blade* dan sudut terhadap *velocity* turut dianalisis dalam studi numerik ini. Penambahan jumlah *blade* beserta sudut terbukti mampu meningkatkan nilai *velocity* pada turbin secara signifikan. Nilai *velocity* terendah diperoleh pada konfigurasi *blade* 4 dengan sudut 0°, yakni sebesar 59,5564 m/s, sedangkan data *velocity* tertinggi diperoleh pada konfigurasi *blade* 8 dengan sudut 12,5°, yakni sebesar 144,5073 m/s. Peningkatan nilai *velocity* tersebut berdampak pada meningkatnya nilai debit, daya turbin, serta efisiensi yang dihasilkan. Distribusi kecepatan yang timbul pada *turbine vortex ultra-low head* ditunjukkan pada gambar 8. Secara mekanisme, peningkatan ini terjadi karena penambahan jumlah *blade* memperbanyak bidang tangkap (*blade surface*) yang berinteraksi dengan aliran *vortex*, sehingga momentum sudut fluida dapat ditransfer secara lebih merata ke seluruh keliling *runner* dan mengurangi kebocoran aliran (*flow leakage*) melalui celah antar *blade* yang lebih lebar pada konfigurasi 4 *blade*. Penambahan sudut kemiringan *blade* (dari 0° - 12,5°) memperbesar sudut serang (*angle of attack*) efektif terhadap arah aliran tangensial *vortex*, sehingga komponen gaya normal terhadap permukaan *blade* meningkat dan mempercepat rotasi *runner*. Kecenderungan ini konsisten dengan temuan [21] yang melaporkan bahwa panjang sudu dan sudut keluar merupakan faktor paling dominan terhadap torsi dan efisiensi turbin *vortex*, serta sejalan dengan [13] yang menunjukkan performa optimum tidak selalu diperoleh pada sudut terbesar, melainkan pada kombinasi sudut dan jumlah sudu yang mampu memaksimalkan transfer momentum tanpa menimbulkan hambatan aliran berlebih.

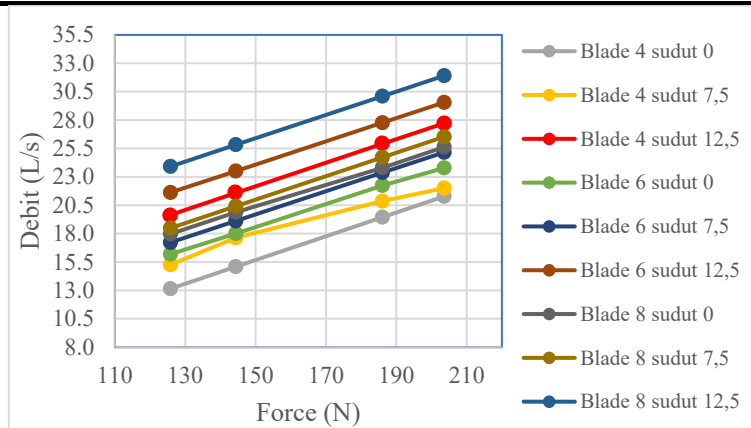
Gambar 8 menunjukkan kecepatan aliran dalam *basin turbine* cenderung mengalami peningkatan. Terdapat sejumlah aspek yang dapat memengaruhi kecepatan arah gerak fluida pada *turbine* ini, di antaranya kemiringan sudut *basin*, kekasaran permukaan *basin*, serta ukuran juga bentuk *basin* itu sendiri. Perubahan kecepatan arah gerak fluida pada *turbine* biasanya dipicu oleh gesekan antarpartikel fluida, gesekan pada fluida dengan dinding *basin*, serta transfer gaya akibat dampak fluida pada dinding *blade*. Berdasarkan karakteristik *contour velocity* yang ditampilkan di gambar 8, aliran fluida cenderung teratur pada saat memasuki *basin*, namun ketika mendekati area di sekitar *blade*, aliran tersebut membentuk gerak rotasi putar sebelum akhirnya keluar menuju saluran *outlet basin*. Selain itu, karakteristik arah aliran juga dipengaruhi oleh besarnya nilai viskositas, tekanan (Pa), kepadatan (densitas), dan geometri sistem secara keseluruhan. Kompleksitas geometri *blade* berpotensi memicu terjadinya fenomena adveksi aliran di sekitar permukaan *blade*, sehingga separasi aliran dapat berkembang secara maksimal di dalamnya. Berdasarkan uraian tersebut, kinerja *turbine reaksi vortex ultra-low head* dapat dinyatakan tervalidasi dan layak dijadikan salah satu solusi optimal dalam studi

numerik ini. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan rancangan turbin, sekaligus menjadi rekomendasi untuk studi numerik lanjutan maupun penerapannya secara praktis di lapangan.



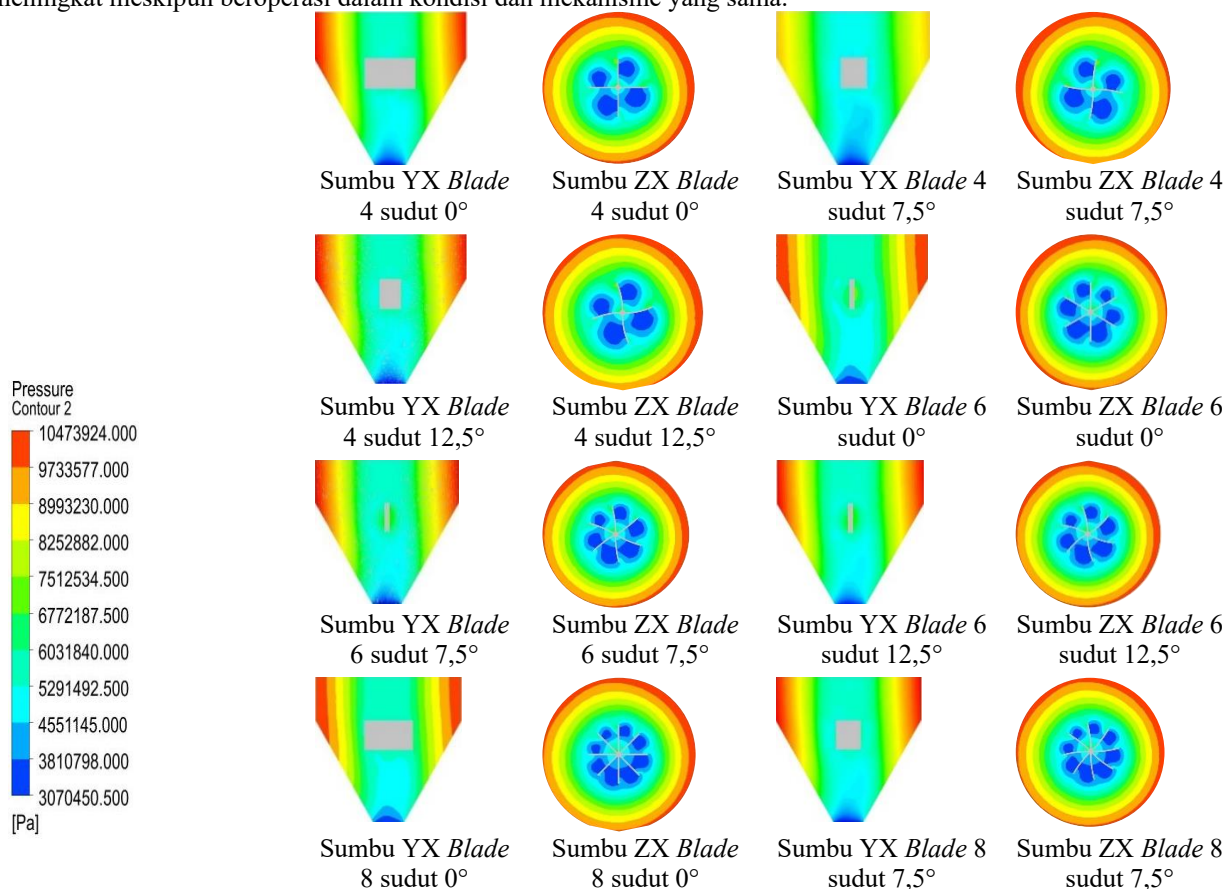
Gambar 8. Kontur Distribusi *Velocity* Pada Turbin Dengan Variasi Jumlah Dan Sudut *Blade*.

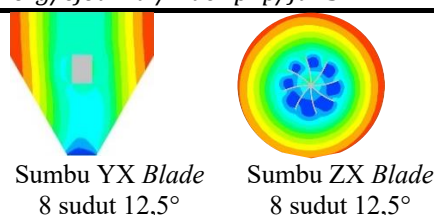
Gambar 9 menunjukkan hubungan antara hasil numerik nilai *Force* atas debit *turbine*. Nilai debit tertinggi dihasilkan *blade* 8 sudut 12,5° dikecepatan 36,63 m/s dengan nilai debit 31,91 L/s, sedangkan yang terendah adalah pada *blade* 4 sudut 0° dikecepatan 23,13 m/s dengan nilai debit 13,15 L/s. Diameter rotor dan panjang *blade* yang besar berpotensi menjebak *volume* air yang banyak, sehingga debit air yang dihasilkan turbin pun ikut meningkat. Kondisi ini secara langsung berkontribusi pada peningkatan daya listrik yang dibangkitkan oleh turbin. Oleh karena itu, panjang *blade* yang tepat menjadi faktor penting agar *volume* air yang tertangkap dapat lebih maksimal, sehingga debit air yang keluar dari *outlet* juga meningkat secara keseluruhan. Dari hasil studi numerik ini, penelitian selanjutnya mengenai variasi dimensi *basin*, diameter rotor, dan panjang *blade turbine* masih perlu dilakukan untuk mengoptimalkan *power* dan *efficiency* kerja *turbine*.

**Gambar 9.** Nilai *Force* Terhadap Debit

3.2 Pengaruh geometri sudut *blade*

Optimisasi *turbine vortex ultra-low head* dilakukan melalui pendekatan numerik dengan memvariasikan jumlah dan sudut *blade* untuk menemukan nilai paling optimum. Kedua variasi tersebut memiliki ikatan yang kuat terhadap hasil pengolahan data numerik dalam simulasi. Variasi yang diusulkan meliputi jumlah *blade* (4, 6, dan 8) serta sudut tumbukan (0° , $7,5^\circ$, dan $12,5^\circ$). Pengambilan data dan plot *contour* studi numerik ini dilakukan saat *turbine* bekerja dalam kondisi tunak (*steady state*) agar distribusi konturnya merata. Variasi jumlah dan sudut *blade* ini juga berpengaruh signifikan terhadap parameter kecepatan, debit, dan tekanan (Pa), di mana pengaruhnya meningkat dengan bertambahnya jumlah *blade* dan besar sudut. Jumlah *blade* yang lebih banyak terbukti meningkatkan performa karena aliran radial dan aksial dapat dimanfaatkan secara optimal untuk menciptakan transfer momentum pada *runner*, sehingga kinerja turbin meningkat meskipun beroperasi dalam kondisi dan mekanisme yang sama.

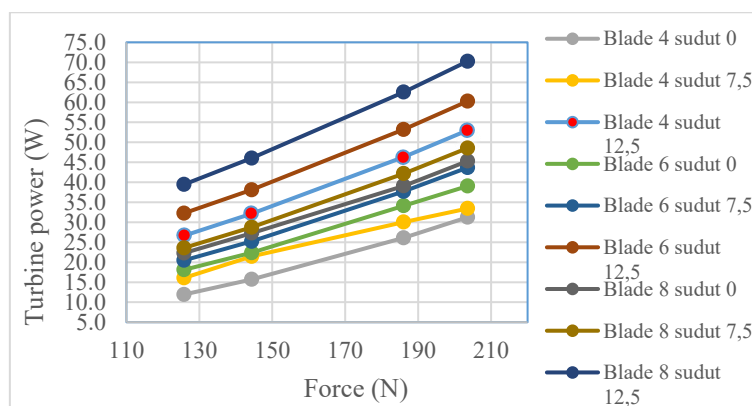




Gambar 10. Kontur Distribusi *Pressure* Pada Turbin Dengan Variasi Jumlah Dan Sudut *Blade*.

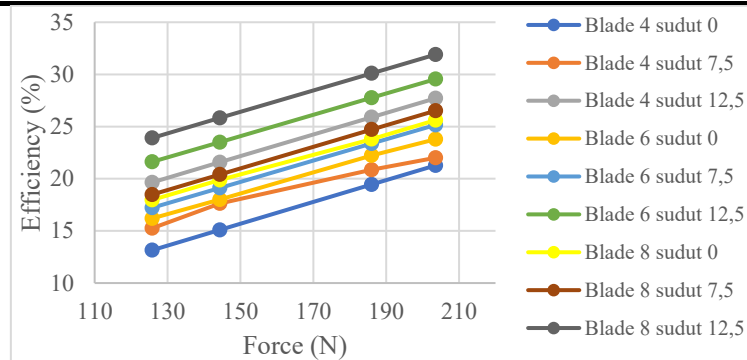
Performa *turbine* dipengaruhi beberapa variabel, seperti tekanan vakum, susunan *blade*, serta keadaan fluida air yang masuk dan keluar dari *turbine*. Di samping parameter kecepatan (*velocity*), studi numerik ini menunjukkan bahwa variasi jumlah dan sudut *blade* memberikan dampak terhadap kenaikan tekanan pada *turbine*. Tekanan fluida terpantau terakumulasi di sekitar dinding basin, lalu menurun secara bertahap saat mendekati area *blade*. Penurunan ini disebabkan oleh adanya separasi aliran yang memicu timbulnya *adveksi* di sekitar *blade*. Distribusi tekanan pada kondisi tunak (*steady state*) tersebut disajikan pada gambar 10. Berdasarkan simulasi numerik, besaran tekanan yang dihasilkan berkisar antara 525.093 hingga 1.353.400 Pa. Hasil studi juga menunjukkan bahwa variasi 8 *blade* dengan sudut 12,5° menghasilkan nilai tekanan tertinggi dibandingkan variasi lainnya. Tekanan yang optimal ini diharapkan dapat berkontribusi langsung dalam meningkatkan daya keluaran turbin.

Peningkatan variasi jumlah dan sudut *blade* pada seluruh algoritma perhitungan dalam studi numerik ini menunjukkan adanya kenaikan pada nilai *power turbine* yang dihasilkan. Semakin tinggi debit air yang membentur *turbine blade*, maka meningkat besar *power* yang didapatkan oleh *turbine* tersebut. Hubungan antara jumlah dan sudut *blade* terhadap *power turbine* dapat dilihat pada gambar 11. Nilai *power turbine* tertinggi dalam studi numerik ini diperoleh pada konfigurasi *blade* 8 dengan sudut 12,5° pada kecepatan 36,63 m/s, yaitu sebesar 70,27 W. Sebaliknya, nilai *power* terendah diperoleh pada konfigurasi *blade* 4 dengan sudut 0° pada kecepatan 23,13 m/s, yaitu sebesar 11,94 W.



Gambar 11. Nilai *Force* Terhadap Daya.

Untuk mengetahui bagaimana jumlah dan sudut *blade* memengaruhi efisiensi turbin, dilakukan kajian melalui studi numerik. Secara sederhana, efisiensi turbin dapat dipahami sebagai ukuran kemampuan turbin mengubah energi mekanis dari putaran menjadi energi listrik. Berbagai faktor turut menentukan besarnya efisiensi ini, baik dari sisi eksperimental maupun teoritis, mulai dari susunan *blade*, keadaan fluida yang masuk ataupun keluar sistem, debit, massa jenis air, percepatan gravitasi, hingga tinggi jatuh air (*head*). Namun demikian, kajian dalam penelitian ini secara khusus diarahkan pada pengaruh variasi jumlah dan sudut *blade* terhadap efisiensi tersebut.



Gambar 12. Nilai Force Terhadap Efficiency.

Kinerja sudut tumbukan sudu *runner* yang diteliti nilai debit paling tinggi dihasilkan *blade* 8 sudut 12,5° dikecepatan 36,63 m/s dengan nilai debit 31,91 L/s, kondisi tersebut memicu *efficiency* meningkat dengan nilai 31,91%. Konsiderasi ini membuktikan bahwa bertambahnya jumlah dan sudut *blade* dapat meningkatkan nilai *efficiency* turbin, sehingga dengan bertambahnya variasi jumlah dan sudut *blade* memungkinkan dapat meningkatkan kinerja *Runner turbine vortex* pada studi numerik dan dapat digunakan pedoman dalam studi numerik dengan persoalan *turbine*. Gambar 12 menunjukkan nilai *force* terhadap *efficiency* pada *turbine*. Nilai *efficiency* terendah ditemukan studi numerik jumlah *blade* 4 sudut 0° dikecepatan 36,63 m/s dengan nilai *efficiency* 21,28%. yang menegaskan bahwa kombinasi penambahan jumlah dan sudut *blade* secara simultan memberikan peningkatan performa yang lebih besar dibandingkan pendekatan satu parameter pada penelitian [13], [18], [19], dan [20]. Hasil ini membuktikan bahwa bertambahnya jumlah dan sudut *blade* dapat meningkatkan nilai *turbine efficiency*, sehingga dapat digunakan sebagai pedoman dalam studi numerik lanjutan pada persoalan *turbine vortex ultra-low head*.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil investigasi model numerik turbin reaksi *vortex ultra-low head* dengan variasi jumlah dan sudut *blade*, diketahui bahwa performa turbin semakin meningkat seiring bertambahnya jumlah dan sudut *blade* yang diusulkan. Kondisi paling optimal tercapai pada 8 *blade* sudut 12,5° pada kecepatan 36,63 m/s, dengan model turbulensi *viscous k- ω Standard* dan metode pemecah *coupled*, menghasilkan debit tertinggi sebesar 31,91 L/s serta efisiensi tertinggi sebesar 31,91% meningkat 18,76 poin persentase dibandingkan konfigurasi 4 *blade* sudut 0° (13,15%). Secara ilmiah, penelitian ini berkontribusi dengan menunjukkan bahwa variasi jumlah dan sudut *blade* yang dilakukan secara simultan bukan satu parameter seperti pada sebagian besar penelitian terdahulu [13][18], [20] memberikan peningkatan performa *turbine vortex ultra-low head* yang lebih besar dan terkuantifikasi secara eksplisit terhadap *baseline* pembanding [23], sekaligus menegaskan bahwa interaksi antara jumlah dan sudut *blade* merupakan faktor yang saling memperkuat (bukan aditif sederhana) dalam meningkatkan transfer momentum pada *runner*. Secara praktis, konfigurasi 8 *blade* sudut 12,5° dapat direkomendasikan sebagai acuan desain awal untuk pengembangan *turbine vortex ultra-low head* pada instalasi *pico-hydropower* dengan karakteristik aliran serupa dengan yang dikaji pada penelitian ini. Dengan demikian, model simulasi yang digunakan dalam penelitian ini mencakup model turbulensi *k- ω Standard*, metode pemecah *coupled*, dan *mesh* 513.810 elemen dinyatakan telah tervalidasi dan layak dijadikan acuan (*baseline*) pada tahap simulasi numerik selanjutnya, baik untuk mengembangkan variasi parameter geometri tambahan (dimensi *basin*, diameter rotor, panjang *blade*) maupun untuk divalidasi lebih lanjut melalui pengujian eksperimental penuh dan analisis ketidakpastian numerik guna memperkuat keandalan hasil, sebagaimana diuraikan pada keterbatasan penelitian di atas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan fasilitas komputasi yang digunakan selama proses simulasi pada penelitian ini, khususnya dalam menjalankan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk analisis performa turbin *vortex ultra low head*. Penulis juga menyampaikan terima kasih atas teknis dan masukan berharga terkait pemodelan variasi jumlah dan sudut *blade*, sehingga proses simulasi pada penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Tidak lupa, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyelesaian penelitian ini.

REFERENCES

- [1] R. A. Anugrah, Y. Budiman, A. Widyianto, A. Hadi, H. S. Novanto, and A. Yudianto, "Novel construction of hybrid wind turbine with solar panels: A comprehensive analysis through experimental study and numerical simulation," *Cleaner Energy Systems*, vol. 13, no. 100242, pp. 2772–7831, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.cles.2026.100242.
- [2] L. Sanchez-Cortez *et al.*, "Pico-Hydropower and Cross-Flow Technology: Bibliometric Mapping of Scientific Research and Review," *Water (Switzerland)*, vol. 17, no. 24, pp. 2–31, Dec. 2025, doi: 10.3390/w17243524.
- [3] G. Todorov, K. Kamberov, T. Ivanov, and R. Miltchev, "Concept Assessment for an Application of a Crossflow Turbine Module for an In-Stream Hydropower System," *Energies (Basel)*, vol. 19, no. 3, pp. 2–15, Jan. 2026, doi: 10.3390/en19030591.
- [4] A. R. Sánchez, J. A. S. Del Rio, and T. Pujol, "Numerical study and theoretical comparison of outlet hole geometry for a gravitational vortex turbine," *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 491–506, Dec. 2021, doi: 10.17509/ijost.v6i3.38951.
- [5] I. Kurniawan, H. Siswanto, and A. Hamzah, "Pengaruh Geometri Basin Terhadap Aliran Vortex: Kajian pada Basin Conical, Conical Convex dan Silinder dengan CFD," *SURYA TEKNIKA*, vol. 11, no. 1, pp. 332–336, Jun. 2024, doi: 10.37859/jst.v11i1.7187.
- [6] I. Kurniawan, A. D. Prayoga, and Herisiswanto, "Analisis kinerja turbin vortex dengan variasi sudu biomimetik berbentuk rumah keong," *Proceeding SNTTM BKS-TM Indonesia*, vol. 23, no. 1, pp. 163–170, Oct. 2026, doi: 10.71452/gbz8f971.
- [7] A. Khalid, F. Khaled, and S. S. Guillo, "Study of the Effects of Waves on the Evolution of Scour Under a Tidal Turbine by Two-Phase Numerical Modeling," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 2–29, Feb. 2026, doi: 10.3390/jmse14030308.
- [8] L. Xu, G. Chen, and X. Song, "Experimental Study on the Evolution Characteristics of Sand-Laden Vortex Based on Energy Gradient Theory," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 2–15, Jan. 2026, doi: 10.3390/jmse14020166.
- [9] J. C. Guerra, A. Rubio-Clemente, and E. Chica, "From Ancient Aqueducts to Modern Turbines: Exploring the Impact of Nazca-Inspired Spiral Geometry on Gravitational Vortex Turbine Efficiency," *Sci*, vol. 8, no. 2, pp. 1–34, Feb. 2026, doi: 10.3390/sci8020034.
- [10] Warjito, Budiarmo, C. R. Christopher, and D. Adanta, "The effect of basin geometry on gravitational vortex hydropower," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2020, p. 788. doi: 10.1088/1757-899X/788/1/012081.
- [11] M. Shohibun Amin *et al.*, "ANALISIS VARIASI BASIN TURBIN REAKSI VORTEX ULTRA LOW-HEAD SUDU AKSIAL MENGGUNAKAN METODE CFD," *Momentum*, vol. 20, no. 2, pp. 195–205, 2024, doi: 10.36499/jim.v20i1.12100.
- [12] N. Maika, M. Khatamifar, and W. Lin, "Numerical Study on the Performance of a Gravitational Water Vortex Hydro-Turbine System with a Cylindrical Basin," *Energies (Basel)*, vol. 19, no. 5, pp. 2–35, Mar. 2026, doi: <https://doi.org/10.3390/en19051334>.
- [13] I. N. Mariawan, M. Sucipta, and M. Suarda, "Kinerja Turbin Vortex dengan Sudu Semi Twisted Curve," *Jurnal METTEK*, vol. 8, no. 1, pp. 53–58, Jul. 2022, doi: 10.24843/mettek.2022.v08.i01.p07.
- [14] G. Suwoto, S. Jurusan, T. Mesin, N. Semarang, and J. H. Sudarto, "PEMBUATAN TURBIN VORTEX DENGAN SUDU PIPA BELAH TIGA DENGAN SUDUT KEMIRINGAN SUDU 45°," *EKSERGI Jurnal Teknik Energi*, vol. 14, no. 3, pp. 72–77, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.32497/eksergi.v14i3.1372>.
- [15] P.-R. Andrés Julián, J. D. Pérez, F.-A. Santiago, and J. Andrés Sierra Del Rio, "Parametric Rotor Innovation for Gravitational Vortex Turbines: Advancing Clean Energy through Integrated Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation and Experimentation to Support the Sustainable Development Goals (SDGs) Parametric Rotor Innovation for Gravitational Vortex Turbines: Advancing Clean... | 392," *Indonesian Journal of Science & Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 391–410, 2026, doi: 10.17509/ijost.v11i3.90012.
- [16] B. Vinayakumar, R. Antony, V. A. Binson, and S. Youhan, "Experimental and numerical study on gravitational water vortex power plant for small water bodies," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 7, p. 100460, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100460.
- [17] P. Xu, L. Li, and W. Jiao, "Hydraulic Performance of a Box Culvert-Type Two-Way Channel Pumping System: An Experimental Study," *Water (Switzerland)*, vol. 18, no. 3, p. 390, Feb. 2026, doi: 10.3390/w18030390.
- [18] B. Kurniawan, R. Purnama Putra, Y. Fernanda, and F. Qalbina, "Analysis of the Effect of Bottom Blade Inclination Angle Variations on Torque in Vortex Turbines Using Computational Fluid Dynamics (CFD)," *Jurnal Vokasi Mekanika*, vol. 7, no. 3, pp. 423–432, Aug. 2025, doi: 10.24036/vomek.v7i3.881.
- [19] I. G. K. Sukadana, Made Suarda, I Putu Widiarta, and Ishak Danus, "CFD (Computational Fluid Dynamics) Simulation of Hydrodynamic Vortex Turbine Performance: Influence of Notch Angle Variation on Flow Patterns

- and Efficiency,” *Natural Sciences Engineering and Technology Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 336–351, Sep. 2024, doi: 10.37275/nasetjournal.v4i2.56.
- [20] M. Suarda, M. Sucipta, A. Ghurri, I. P. Widiarta, F. Liam, and Y. R. R. Pradana, “Study on water flow patterns and vortex turbine performance with variations in runner impact angle,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 3186, no. 1, Mar. 2026, doi: 10.1088/1742-6596/3186/1/012040.
- [21] L. Sa’diyah Yuniar Arifianti *et al.*, “Enhancing the efficiency of a gravitational water vortex turbine through blade length and exit angle optimization,” *EPJ Web Conf.*, vol. 344, no. 01012, p. 01012, Dec. 2025, doi: 10.1051/epjconf/202534401012.
- [22] N. Maika, W. Lin, and M. Khatamifar, “A Review of Gravitational Water Vortex Hydro Turbine Systems for Hydropower Generation,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 14, pp. 2–39, Jul. 2023, doi: 10.3390/en16145394.
- [23] Made Suarda, Made Sucipta, Ni Putu Rika Anindya Wahyuni, and Ni Ketut Restia Dewi, “Kajian Parameter Optimal Desain Turbin Vortex Pada Head Sangat Rendah,” Nov. 2023. doi: SeminarNasionalSainsdanTeknologi(SENASTEK).
- [24] M. Safi, N. Sinaga, T. Priangkoso, A. Digdoyo, J. Teknik Mesin, and F. Teknik dan Ilmu Komputer, “INVESTIGASI MODEL NUMERIK PADA SIMULASI HEAT SINK SIRIP LURUS DENGAN MEMVARIASIKAN JUMLAH GRID, MODEL VISCOUS DAN METODE PEMECAHAN DENGAN PENDINGINAN KONVEKSI BEBAS,” *Momentum*, vol. 20, no. 1, pp. 31–41, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.36499/jim.v20i1.10457>.
- [25] M. Safi’i, N. Sinaga, M. S. Amin, and M. S. Amin, “TURBINE INVESTIGASI MODEL NUMERIK TURBIN REAKSI VORTEX ULTRA-LOW HEAD DENGAN MEMVARIASIKAN JUMLAH GRID DAN METODE PEMECAHAN SOLUSI,” *Device*, vol. 14, no. 2, pp. 225–235, Nov. 2024, doi: 10.32699/device.v14i2.8067.
- [26] M. Safi’i, N. Sinaga, Syaiful, “Kaji umerik Kinerja Oblique Heat Sink Dengan Memvariasikan Sudut Oblique Serta Jarak Longitudinal Dan Transversal Sirip,” (2022), doi: Departemen Teknik Mesin, Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.