

ANALISIS NUMERIK PENGARUH PERUBAHAN JARAK *PITCH* TERHADAP CAPAIAN TORSI PADA TURBIN ULIR PORTABEL MENGGUNAKAN SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD)

Maulana Abdi Ardiyansyah¹, Muhamad Safi'i², Althesa Androva³

^{1*}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Semarang 50232

^{2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Semarang 50232.
email: ^{1*} maulanaabdi0609@gmail.com

Submitted Date: Mei 15, 2026

Revised Date: Mei 25, 2026

Reviewed Date: Mei 20, 2026

Accepted Date: Mei 30, 2026

Abstract

Archimedes screw turbines are widely used for low-head hydropower applications due to their simple construction and ability to operate under low-flow conditions. However, studies on the effect of pitch variation on the performance of portable screw turbines remain limited. This study investigates the influence of pitch variation on the torque performance of a portable Archimedes screw turbine using Computational Fluid Dynamics (CFD). Simulations were conducted on a single-blade turbine with a 45° inclination angle and an inlet flow velocity of 1 m/s. Two pitch configurations, 60 mm and 90 mm, were analyzed using the $k-\omega$ SST turbulence model. The results show that the 60 mm pitch configuration produced the highest torque of 2.083 Nm, while the 90 mm pitch generated 1.337 Nm. The smaller pitch provided a more uniform pressure distribution and more stable flow characteristics, resulting in better fluid interaction with the blade surface. These findings indicate that pitch variation significantly affects turbine performance, and the 60 mm pitch configuration is recommended for low-head portable micro-hydropower applications.

Keywords: Archimedes Screw Turbine, Portable Screw Turbine, Pitch Variation, CFD, Torque.

Abstrak

Turbin ulir Archimedes merupakan salah satu teknologi yang sesuai untuk pembangkit listrik tenaga air dengan head rendah karena memiliki konstruksi sederhana dan mampu beroperasi pada debit aliran yang relatif kecil. Namun, penelitian mengenai pengaruh variasi *pitch* terhadap performa turbin ulir portabel masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi *pitch* terhadap capaian torsi turbin ulir portabel menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Simulasi dilakukan pada model turbin satu bilah dengan sudut kemiringan 45° dan kecepatan aliran masuk 1 m/s. Variasi *pitch* yang dianalisis adalah 60 mm dan 90 mm menggunakan model turbulensi $k-\omega$ SST. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *pitch* 60 mm menghasilkan torsi tertinggi sebesar 2,083 Nm, sedangkan *pitch* 90 mm menghasilkan torsi sebesar 1,337 Nm. *Pitch* 60 mm menghasilkan distribusi tekanan yang lebih merata dan karakteristik aliran yang lebih stabil sehingga interaksi fluida dengan sudu menjadi lebih efektif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi *pitch* berpengaruh signifikan terhadap performa turbin ulir portabel, dan konfigurasi *pitch* 60 mm direkomendasikan untuk aplikasi mikrohidro ber-head rendah.

Kata Kunci: Turbin Ulir Portabel, Turbin Ulir Archimedes, Variasi *Pitch*, *Computational Fluid Dynamics*, Torsi

I. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara dengan kebutuhan energi listrik yang terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, industrialisasi, dan perkembangan teknologi. Di sisi lain, pemanfaatan energi terbarukan masih menghadapi berbagai tantangan. Data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM)

menunjukkan bahwa capaian bauran energi terbarukan Indonesia masih berada di bawah target Kebijakan Energi Nasional sebesar 23% pada tahun 2026. Salah satu teknologi yang paling potensial untuk kondisi ini adalah turbin ulir (*Archimedes Screw*), yang terbukti efektif dioperasikan pada lokasi dengan karakteristik head dan debit air yang rendah (Nurdin et al., 2018).

Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar adalah tenaga air. Indonesia memiliki potensi tenaga hidro sekitar 95 GW, namun pemanfaatannya masih relatif rendah dibandingkan potensi yang tersedia. Sebagian besar sumber daya air tersebut berasal dari sungai kecil, saluran irigasi, dan jaringan pengairan yang memiliki karakteristik head rendah (*low-head*), sehingga kurang optimal apabila memanfaatkan turbin air konvensional yang umumnya membutuhkan head yang lebih tinggi.

Turbin ulir Archimedes (*Archimedes Screw Turbine*) merupakan salah satu teknologi yang menjanjikan untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga mikrohidro pada kondisi head rendah. Turbin ini memiliki konstruksi sederhana, biaya perawatan yang relatif rendah, ramah lingkungan, serta mampu beroperasi pada debit kecil hingga menengah. Turbin ulir memiliki performa yang baik pada kondisi *low-head* dan sesuai untuk diterapkan pada daerah pedesaan maupun wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik secara optimal (YoosefDoost & Lubitz, 2020). Selain itu, pengembangan turbin ulir portabel berpotensi digunakan sebagai sumber energi pada daerah bencana, kawasan pertanian, dan wilayah Terdepan, Terluar, dan Tertinggal (3T) karena dapat dipasang tanpa memerlukan infrastruktur sipil yang kompleks.

Kinerja turbin ulir dipengaruhi oleh berbagai parameter geometris, seperti sudut kemiringan, jumlah sudu, diameter ulir, debit aliran, dan jarak *pitch*. Di antara parameter tersebut, *pitch* memiliki peran penting karena memengaruhi volume air yang tertahan di antara sudu, distribusi tekanan, pola aliran, dan transfer momentum menuju poros turbin. Geometri *pitch* berpengaruh langsung terhadap kapasitas penampungan air dan efisiensi konversi energi (Nuernbergk & Rorres, 2013). *Pitch* yang terlalu besar menyebabkan berkurangnya gaya dorong fluida terhadap sudu, sedangkan *pitch* yang terlalu kecil berpotensi meningkatkan turbulensi dan

kehilangan energi. Pada penelitian sebelumnya variasi jumlah sudu (*blade*) memiliki dampak signifikan terhadap perolehan torsi dan efisiensi sistem (Almuhizzun et al., 2023).

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh sudut kemiringan, jumlah sudu, debit aliran, dan diameter turbin terhadap performa turbin ulir. Perubahan geometri turbin memberikan pengaruh signifikan terhadap performa hidrodinamika yang dihasilkan (Dellinger et al., 2019). Kajian mendalam mengenai pengaruh parameter geometris terhadap efisiensi hidrolis pada turbin screw skala kecil. Salah satu temuan kuncinya adalah pentingnya rasio antara jarak *pitch* (*p*) dengan diameter luar (*D*). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa untuk turbin dengan jumlah sudu tunggal (1-blade), terdapat ambang batas optimal di mana penambahan jarak *pitch* dapat meningkatkan volume pengisian air, namun jika terlalu lebar akan menyebabkan penurunan tekanan hidrostatik yang drastis pada sudu (Rohit & Mohan, 2016).

Untuk menjawab permasalahan tersebut, penelitian ini menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Metode ini mampu memprediksi perilaku aliran fluida melalui penyelesaian persamaan konservasi massa dan momentum sehingga distribusi tekanan, karakteristik kecepatan, turbulensi, dan interaksi fluida dengan geometri turbin dapat dianalisis secara rinci. Selain itu, CFD memungkinkan evaluasi berbagai variasi desain tanpa memerlukan pembuatan prototipe fisik secara berulang sehingga lebih efisien dari segi waktu dan biaya.

Pada penelitian ini, variasi *pitch* 60 mm dan 90 mm dipilih berdasarkan pertimbangan geometris terhadap dimensi turbin yang digunakan. Simulasi dilakukan menggunakan model turbulensi *k- ω Shear Stress Transport* (SST) yang memiliki kemampuan baik dalam memprediksi fenomena *boundary layer* dan separasi aliran pada geometri kompleks. Untuk

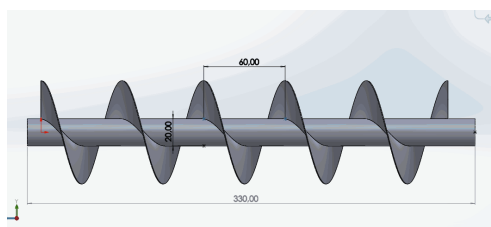
menjamin keandalan hasil simulasi, dilakukan pula uji independensi grid (*grid independence test*) sehingga hasil perhitungan tidak dipengaruhi oleh jumlah elemen *mesh* yang digunakan.

Torsi dipilih sebagai parameter utama karena merupakan indikator langsung kemampuan turbin dalam mengubah energi hidraulik menjadi energi mekanik pada poros. Melalui simulasi CFD, distribusi tekanan, *velocity contour*, dan *streamline* dapat dianalisis untuk menjelaskan hubungan antara variasi *pitch* dan performa torsi yang dihasilkan.

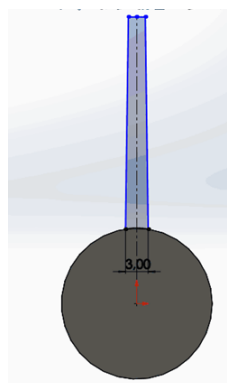
Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis numerik pengaruh variasi *pitch* 60 mm dan 90 mm terhadap distribusi tekanan, karakteristik aliran, dan capaian torsi pada turbin ulir portabel menggunakan metode CFD. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi *pitch* terhadap performa hidrodinamika turbin ulir portabel sehingga dapat diperoleh konfigurasi yang lebih optimal untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga mikrohidro dengan *head* rendah di Indonesia.

II. Metode Penelitian

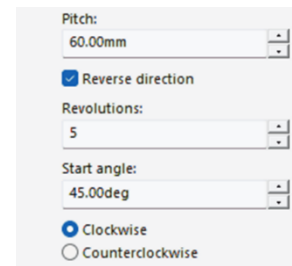
Model Fisik



Gambar 1: Dimensi Turbin Ulir Portabel pitch 60



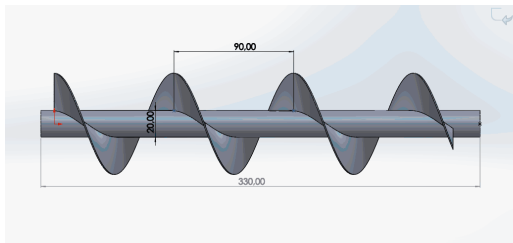
(a)



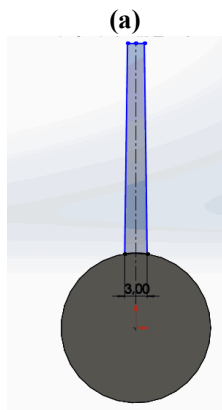
(b)

Seluruh model turbin dikonstruksi menggunakan perangkat lunak *SolidWorks* 2023. Dimensi standar yang ditetapkan meliputi diameter eksternal 76 mm, diameter poros tengah 20 mm, serta panjang keseluruhan 330 mm. Perbedaan utama terletak pada jumlah uliran: pada *pitch* 60 mm terbentuk 5 putaran sudu, sedangkan pada *pitch* 90 mm hanya terdapat sekitar 3,33 putaran. Untuk menjaga integritas struktur saat menerima beban hidrodinamis, sudu dirancang dengan ketebalan 3 mm

Parameter geometri turbin ulir portabel dalam simulasi ini mencakup diameter luar sebesar 76 mm dan diameter poros 20 mm. Perbandingan diameter tersebut dirancang sedemikian rupa untuk mengoptimalkan volume air yang dapat ditampung oleh sudu. Sesuai dengan ilustrasi pada Gambar 1, komponen ulir memiliki panjang keseluruhan 330 mm, di mana pengujian difokuskan pada variasi *pitch* 60 mm dan 90 mm dengan sudut kemiringan operasional 45°. Proses pemodelan pada perangkat lunak *SolidWorks*, sebagaimana ditampilkan dalam Gambar (a), menerapkan pengaturan *start angle* 45° dengan rotasi searah jarum jam (*clockwise*). Fitur *reverse direction* juga diaktifkan untuk menyesuaikan orientasi akhir sudu terhadap arah datangnya aliran air. Selain itu, guna menjamin ketahanan struktural saat menahan beban torsi, sudu tunggal ini dibuat dengan ketebalan 3 mm, yang rincian profil melintangnya dapat dilihat pada Gambar (b)



Gambar 2: Dimensi Turbin Ulir pitch 90



Parameter geometri turbin ulir portabel ini ditentukan oleh diameter luar sebesar 76 mm dan diameter poros 20 mm, dengan panjang poros total mencapai 330 mm. Sebagaimana teridentifikasi dari komparasi antara Gambar 1 dan Gambar 2, terdapat perbedaan jumlah sudu yang nyata untuk mengakomodasi panjang efektif turbin: konfigurasi *pitch* 60 mm memerlukan 5 putaran, sementara *pitch* 90 mm hanya mencakup 3,33 putaran. Untuk menentukan orientasi geometri pada sisi luaran (*outlet*), diaplikasikan pengaturan *start angle* 45° dengan fitur *reverse direction* pada perangkat lunak, sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar (a). Hal ini dilakukan karena posisi masuknya aliran fluida berada pada sisi yang berlawanan dari sudut pandang tersebut. Integritas struktur sudu dalam

menghadapi beban torsi dijamin melalui penggunaan sudu dengan ketebalan 3 mm, yang profil melintangnya ditunjukkan pada Gambar (b). Selanjutnya, model volumetrik ini disimpan dalam format IGS untuk diintegrasikan ke dalam lingkungan simulasi ANSYS.

Material

Material yang digunakan pada penelitian turbin ulir portabel ini terdiri atas material sudu turbin, poros utama, serta fluida kerja berupa air. Pemilihan material dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik mekanik, ketahanan terhadap korosi, massa jenis, dan kemampuan material dalam menerima beban hidrodinamis selama proses konversi energi berlangsung.

Pada penelitian ini, sudu turbin (*blade*) dan poros utama menggunakan material Aluminium Alloy 6061. Material tersebut dipilih karena memiliki karakteristik ringan, kekuatan mekanik yang baik, mudah diproduksi, serta memiliki ketahanan korosi yang cukup tinggi terhadap lingkungan perairan. Selain itu, aluminium alloy juga banyak digunakan pada sistem turbin skala kecil karena mampu mengurangi beban rotasi sehingga proses putaran turbin menjadi lebih stabil.

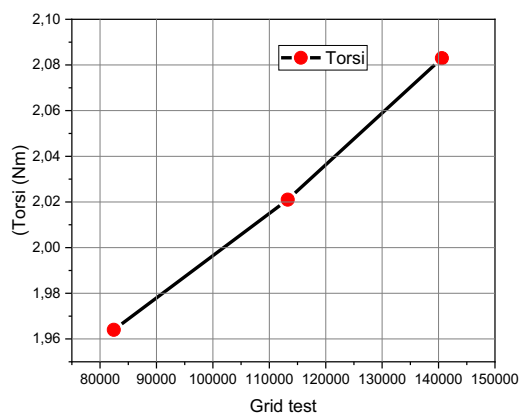
Uji Independen Grid

Uji grid dilakukan untuk menentukan jumlah mesh yang paling optimal pada simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)* sehingga hasil perhitungan numerik yang diperoleh bersifat stabil, akurat, dan tidak dipengaruhi oleh perubahan jumlah elemen mesh. Proses ini sangat penting dalam simulasi numerik karena kualitas mesh berpengaruh langsung terhadap ketelitian distribusi tekanan, kecepatan aliran, serta nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin ulir portabel.

Pada penelitian ini, proses meshing dilakukan menggunakan modul ANSYS *Meshing* dengan tipe *unstructured tetrahedral mesh* karena geometri turbin ulir

memiliki bentuk spiral dan kelengkungan kompleks yang sulit direpresentasikan menggunakan elemen heksagonal konvensional. Selain itu, metode *curvature sizing* diterapkan pada area sudu untuk meningkatkan kerapatan mesh pada bagian yang memiliki perubahan geometri signifikan sehingga fenomena aliran di sekitar blade dapat ditangkap dengan lebih detail.

Pengujian grid dilakukan dengan membandingkan beberapa variasi jumlah *mesh* terhadap nilai torsi yang dihasilkan pada konfigurasi *pitch* 60 mm. Variasi mesh dilakukan dengan mengubah ukuran elemen (*element size*) secara bertahap hingga diperoleh perubahan hasil simulasi yang relatif kecil. Data hasil uji grid ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Grafik Grid Test

Berdasarkan hasil simulasi, terlihat bahwa peningkatan jumlah mesh menyebabkan nilai torsi mengalami kenaikan hingga mencapai kondisi yang relatif stabil. Pada jumlah mesh sebesar 82.436 elemen, nilai torsi yang diperoleh masih relatif rendah karena distribusi aliran dan tekanan pada permukaan sudu belum terdefinisi secara detail. Ketika jumlah mesh ditingkatkan menjadi 113.275 elemen, hasil simulasi mulai menunjukkan peningkatan akurasi dengan kenaikan torsi sebesar 2,021 Nm.

Selanjutnya, pada jumlah mesh sebesar 140.589 elemen dengan ukuran elemen 5 mm, nilai torsi yang dihasilkan mencapai 2,083 Nm dan menunjukkan

perubahan yang tidak terlalu signifikan dibandingkan hasil sebelumnya. Kondisi ini menandakan bahwa solusi numerik telah mendekati kondisi independen grid (*grid independent*), sehingga penambahan jumlah mesh yang lebih besar diperkirakan tidak akan memberikan perubahan hasil yang signifikan namun justru meningkatkan waktu komputasi.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa jumlah mesh sebesar 140.589 elemen dipilih sebagai konfigurasi *mesh* optimal dalam penelitian ini karena mampu memberikan keseimbangan antara akurasi hasil simulasi dan efisiensi waktu komputasi. Selain itu, kualitas mesh pada model ini juga memenuhi standar simulasi ANSYS dengan nilai *skewness* dan *orthogonal quality* yang masih berada dalam batas aman sehingga proses iterasi dapat berlangsung secara stabil dan konvergen.

Secara umum, hasil uji grid membuktikan bahwa kualitas diskretisasi domain fluida memiliki pengaruh penting terhadap prediksi performa turbin ulir portabel, khususnya pada distribusi tekanan, karakteristik aliran, dan capaian torsi yang dihasilkan selama proses simulasi CFD berlangsung.

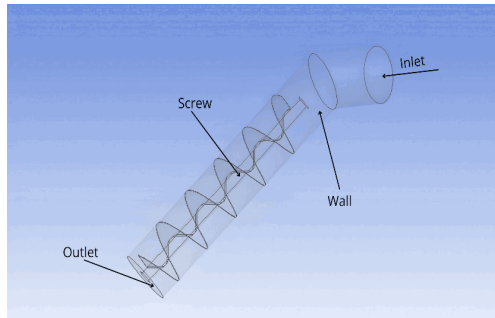
Domain Komputasi

Pemodelan aliran air pada sistem turbin dilakukan dengan membagi domain fluida menjadi dua kategori fungsional: zona *stasioner (stator)* untuk saluran air dan zona rotasi (*rotor*) yang melingkupi unit ulir. Pembagian ini bertujuan untuk menangkap interaksi dinamis antara air dan turbin secara presisi. Selain itu, replikasi kondisi lapangan pada aliran rendah dicapai dengan menetapkan *boundary conditions* yang sesuai dengan spesifikasi teknis pada Tabel 1 dibawah ini

<i>Boundary</i>	<i>Tipe</i>	<i>Spesifikasi Nilai</i>
<i>Inlet</i>	<i>Velocity Inlet</i>	Kecepatan: 1 m/s
<i>Outlet</i>	<i>Pressure Outlet</i>	Tekanan Gauge: 0 Pa

Dinding <i>Housing</i>	<i>Wall</i>	Kondisi No-Slip
Permukaan Ulir	<i>Wall (Moving)</i>	Terkait dengan <i>Dynamic Mesh</i>

Tabel 1



Gambar 4: Boundary conditions

Simulasi ini menerapkan model turbulensi k-Omega *Shear Stress Transport* (SST) karena unggul dalam memprediksi fenomena lapisan batas (*boundary layer*) serta pemisahan aliran yang kompleks pada area sekitar sudu turbin. Dalam proses komputasi, skema *coupled* diaplikasikan dengan diskretisasi *second order upwind* untuk menjamin tingkat akurasi data yang tinggi. Simulasi ini dijalankan pada kondisi *transient* dengan menyertakan pengaruh gaya gravitasi, sementara proses inisialisasi awal menggunakan metode *Hybrid Initialization* untuk mempercepat konvergensi

Mesh Validasi

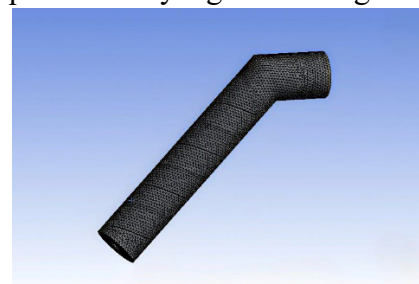
Tahap diskretisasi dalam penelitian ini memanfaatkan modul ANSYS *Meshing* untuk memecah domain fluida menjadi elemen-elemen volume yang lebih kecil. Hal ini diperlukan agar persamaan Navier-Stokes dapat diselesaikan melalui pendekatan numerik. Mengingat geometri sudu turbin ulir memiliki tingkat kelengkungan yang rumit, metode *unstructured mesh* dengan elemen tetrahedral diaplikasikan. Pemilihan elemen *tetrahedral* didasarkan pada fleksibilitasnya dalam mengikuti kontur permukaan sudu yang melingkar secara akurat, melampaui kemampuan elemen heksagonal konvensional. Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa jumlah elemen

yang terbentuk pada kedua variasi *pitch* cenderung serupa. Konsistensi densitas *mesh* ini memastikan bahwa hasil simulasi dari kedua model tetap berada pada standar yang sebanding (*comparable*)

Fariasi <i>Pitch</i>	Elemen Size (mm)	Torsi	Jumlah Mesh (Cells)
60	5	2,083	140.589
90	5	1,337	140.357

Tabel 2

Dalam upaya menyeimbangkan beban komputasi dan ketelitian hasil, ukuran elemen sebesar 5 mm diaplikasikan pada seluruh bagian simulasi. Kerapatan jaringan pada bagian sudu yang melengkung ditingkatkan melalui aktivasi fungsi *curvature sizing*, yang krusial untuk menangkap profil tekanan dan kecepatan di sekitar turbin secara detail. Hasilnya, kedua model uji menghasilkan jumlah diskretisasi yang sebanding, yaitu 140.589 elemen pada konfigurasi *pitch* 60 mm dan 140.357 elemen pada konfigurasi *pitch* 90 mm. Dengan kepadatan elemen yang hampir identik ini, validitas perbandingan kinerja antar desain dapat dipertanggungjawabkan karena meminimalkan pengaruh variabel kerapatan *mesh* yang tidak seragam



Gambar 5: Hasil Meshing

Prosedur diskretisasi diakhiri dengan evaluasi kualitas mesh guna menjamin stabilitas numerik sepanjang proses iterasi. Integritas elemen diuji melalui parameter *skewness* dan *orthogonal quality*. Penjagaan nilai rata-rata kualitas jaringan pada kedua model dilakukan sesuai dengan kriteria standar ANSYS, yang bertujuan untuk mereduksi potensi kesalahan pemuaian (*truncation error*) serta

memastikan pencapaian konvergensi simulasi yang optimal.

Validasi

Validasi data numerik dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) terhadap data eksperimen yang terdapat pada literatur penelitian terdahulu. Proses validasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa metode numerik yang digunakan mampu merepresentasikan fenomena aliran fluida, distribusi tekanan, dan performa turbin ulir Archimedes secara mendekati kondisi eksperimen nyata.

Pada penelitian ini, validasi dilakukan dengan mengacu pada penelitian eksperimen yang dilakukan oleh Dellinger dan YoosefDoost mengenai pengaruh geometri turbin terhadap performa hidrodinamis turbin Archimedes screw. Literatur tersebut menjelaskan bahwa konfigurasi pitch yang lebih rapat mampu meningkatkan volume fluida yang tertahan di antara sudu sehingga distribusi tekanan dan transfer momentum fluida menuju poros turbin menjadi lebih optimal.

Metode numerik pada penelitian ini menggunakan ANSYS Fluent 2020 R2 dengan model turbulensi $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST) karena model tersebut memiliki kemampuan yang baik dalam memprediksi fenomena boundary layer, separasi aliran, dan distribusi tekanan pada geometri spiral turbin ulir. Simulasi dilakukan pada kondisi transient dengan kecepatan aliran masuk sebesar 1 m/s dan sudut kemiringan turbin 45° .

Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi pitch 60 mm menghasilkan distribusi tekanan yang lebih merata dan nilai torsi sebesar 2,083 Nm, sedangkan konfigurasi pitch 90 mm menghasilkan nilai torsi sebesar 1,337 Nm. Tren hasil simulasi tersebut menunjukkan kesesuaian dengan data eksperimen pada literatur, di mana pitch yang lebih rapat menghasilkan performa turbin yang lebih baik dibandingkan pitch yang lebih besar.

Selain itu, pola aliran hasil simulasi juga menunjukkan karakteristik yang serupa dengan fenomena eksperimen pada penelitian terdahulu. Pada pitch 60 mm, aliran fluida terlihat lebih stabil dengan distribusi kecepatan yang terkonsentrasi pada permukaan sudu sehingga transfer energi kinetik menuju energi mekanik berlangsung lebih efektif. Sebaliknya, pada pitch 90 mm terbentuk area turbulensi dan wake region yang lebih besar sehingga sebagian energi fluida hilang sebelum dikonversi menjadi torsi.

Reduksi data Numerik

Reduksi data numerik pada penelitian ini dilakukan untuk mengubah data hasil simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) menjadi parameter performa turbin yang dapat dianalisis secara kuantitatif. Parameter utama yang digunakan meliputi kecepatan aliran, distribusi tekanan, debit aliran, gaya hidrodinamis, dan torsi yang dihasilkan oleh turbin ulir portabel. Seluruh parameter tersebut diperoleh dari hasil simulasi numerik menggunakan ANSYS Fluent 2020 R2.

Dalam simulasi CFD, karakteristik aliran fluida dianalisis berdasarkan persamaan dasar konservasi massa dan momentum yang direpresentasikan melalui persamaan Navier–Stokes. Persamaan kontinuitas digunakan untuk menggambarkan konservasi massa fluida inkompresibel sebagai berikut:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

Sedangkan persamaan momentum Navier–Stokes yang digunakan untuk memprediksi distribusi tekanan dan kecepatan aliran fluida dinyatakan sebagai:

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho$$

Nilai debit aliran fluida yang masuk ke dalam domain simulasi dihitung menggunakan persamaan kontinuitas:

$$Q = A \times V$$

Parameter utama performa turbin pada penelitian ini adalah torsi (torque). Nilai

torsi diperoleh dari hasil interaksi gaya hidrodinamis fluida terhadap permukaan sudu turbin yang menghasilkan momen putar pada poros. Hubungan antara gaya dan torsi dinyatakan sebagai:

$$T = F \times r$$

Selain itu, performa aliran fluida dalam simulasi juga dianalisis menggunakan bilangan Reynolds untuk menentukan karakteristik aliran yang terjadi pada turbin ulir. Persamaan Reynolds number dinyatakan sebagai:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Bilangan Reynolds digunakan untuk mengidentifikasi apakah aliran bersifat laminar atau turbulen. Pada penelitian ini, nilai Reynolds yang tinggi menunjukkan bahwa aliran berada pada kondisi turbulen sehingga model turbulensi k- ω Shear Stress Transport (SST) dipilih karena mampu memprediksi fenomena boundary layer dan separasi aliran secara lebih akurat.

Untuk mengevaluasi distribusi tekanan pada sudu turbin, digunakan hubungan tekanan hidrodinamis berdasarkan prinsip Bernoulli:

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh = \text{konstan}$$

Persamaan tersebut menjelaskan hubungan antara tekanan, energi kinetik, dan energi potensial fluida selama proses aliran berlangsung di sepanjang permukaan sudu turbin.

Melalui pendekatan reduksi data numerik ini, hasil simulasi CFD dapat dianalisis secara sistematis untuk mengetahui pengaruh variasi pitch terhadap distribusi tekanan, karakteristik kecepatan aliran, serta capaian torsi pada turbin ulir portabel.

III. Hasil dan Pembahasan

Analisis Pengaruh Variasi Pitch Terhadap Torsi Turbin

Simulasi CFD menunjukkan bahwa perubahan jarak *pitch* memberikan

pengaruh langsung terhadap kemampuan turbin ulir dalam menghasilkan torsi. Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 3, konfigurasi *pitch* 60 mm menghasilkan torsi sebesar 2,083 Nm, sedangkan pada *pitch* 90 mm nilai torsi menurun menjadi 1,337 Nm. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jarak antar ulir menyebabkan efektivitas transfer energi fluida terhadap sudu menjadi berkurang.

No	Jarak <i>Pitch</i> (mm)	Torsi (Nm)
1	60	2,083
2	90	1,337

Tabel 3

Secara umum, *pitch* yang lebih rapat memungkinkan air tertahan lebih lama di dalam ruang antar sudu sehingga gaya dorong yang bekerja pada permukaan *blade* menjadi lebih besar. Kondisi tersebut meningkatkan momentum fluida yang diteruskan ke poros turbin dan berdampak pada kenaikan torsi. Sebaliknya, pada *pitch* yang lebih besar, sebagian aliran air cenderung bergerak lebih bebas tanpa memberikan tekanan maksimum pada sudu.

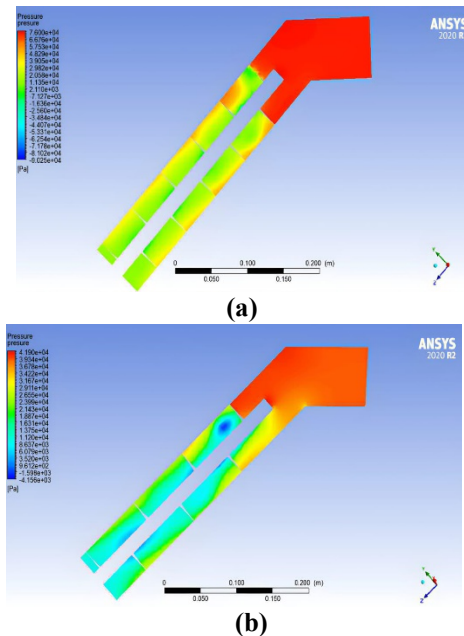
Hasil ini memperlihatkan bahwa konfigurasi geometris memiliki peran penting dalam menentukan performa turbin ulir portabel, khususnya pada kondisi aliran rendah. Dengan semakin kecil jarak *pitch*, interaksi antara fluida dan *blade* menjadi lebih efektif sehingga energi kinetik air dapat dikonversi menjadi energi mekanik secara lebih optimal.

Analisis Distribusi Tekanan pada Permukaan Sudu

Distribusi tekanan hasil simulasi diperlihatkan pada gambar 5, adanya perbedaan karakteristik aliran pada masing-masing variasi *pitch*. Pada konfigurasi *pitch* 60 mm pada gambar 5(a), area tekanan tinggi terlihat lebih dominan dan tersebar merata pada sisi depan sudu. Hal ini menunjukkan bahwa aliran air mampu memberikan gaya tekan yang lebih

besar terhadap blade sehingga menghasilkan momen putar yang lebih tinggi.

Berbeda dengan *pitch* 90 mm yang terdapat pada gambar 5(b), distribusi tekanan cenderung lebih rendah dan tidak merata. Jarak antar sudu yang lebih lebar menyebabkan volume air di dalam bucket tidak dapat dipertahankan secara optimal selama proses aliran berlangsung. Akibatnya, tekanan hidrostatik yang bekerja pada permukaan sudu mengalami penurunan.



Gambar 6: *Pressure Contour* untuk (a) 60mm, (b) 90mm

Kondisi tersebut menandakan bahwa *pitch* yang terlalu besar mengurangi kemampuan turbin dalam memanfaatkan energi potensial fluida. Selain itu, munculnya area bertekanan rendah pada beberapa bagian sudu menunjukkan adanya kehilangan energi akibat aliran yang tidak stabil.

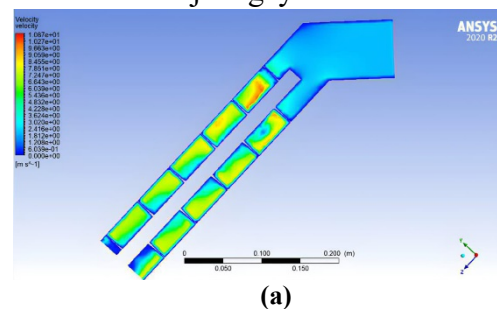
Berdasarkan hasil *pressure contour* menggunakan ANSYS R2 2020 pada konfigurasi *pitch* 60 mm memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan distribusi tekanan selama proses konversi energi berlangsung dengan maksimum tekanan sebesar $7600 \times 10^4 \text{ Pa}$. Sedangkan pada *pitch* 90 mm hanya mendapatkan hasil maksimum tekanan sebesar $4190 \times 10^4 \text{ Pa}$ karena

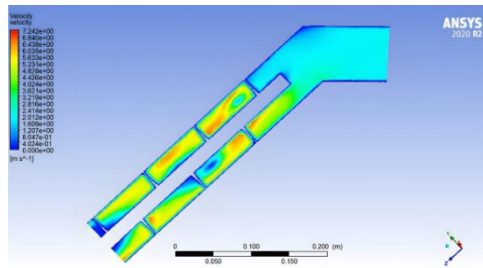
terdapat perbedaan jarak sudu yang lebih lebar mengakibatkan aliran air menjadi lebih longgar dan tidak mampu menekan sudu secara optimal. Hal ini menjadi salah satu faktor utama perbedaan pada *pitch* 60 mm yang mempunyai geometri lebih efisien dalam mengonversi energi air menyebabkan nilai torsi-nya lebih tinggi dibandingkan *pitch* 90 mm.

Analisis Karakteristik Kecepatan Aliran

Visualisasi distribusi kecepatan pada Gambar 6 memberikan gambaran mengenai efektivitas transfer energi kinetik dari fluida ke sudu turbin. Berdasarkan observasi pada Gambar 6(a), penggunaan *pitch* 60 mm menghasilkan pola aliran yang lebih terkonsentrasi dan terarah mengikuti geometri *heliks*. Kecepatan aliran puncak pada variasi ini mencapai 10,87 m/s, yang mengindikasikan pemanfaatan momentum fluida yang optimal untuk menghasilkan torsi pada poros turbin.

Sebaliknya, peningkatan jarak *pitch* menjadi 90 mm Gambar 7(b) memicu degradasi performa aliran secara signifikan. Kecepatan maksimum menurun drastis menjadi 7,24 m/s, disertai dengan perluasan zona *wake* (aliran turbulen di belakang sudu) yang ditandai dengan domain berwarna biru (kecepatan rendah). Fenomena ini menunjukkan bahwa pada *pitch* yang lebih lebar, interaksi antara fluida dan sudu menjadi kurang efektif, di mana sebagian besar energi kinetik terdisipasi menjadi energi panas atau pusaran yang tidak produktif daripada dikonversi menjadi gaya mekanik.





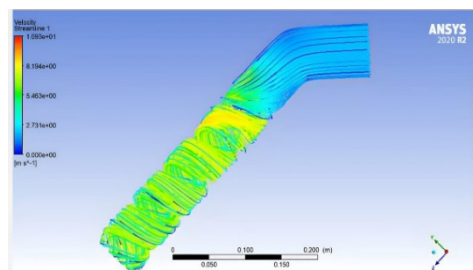
(b)

Gambar 7: *Velocity Contour* untuk (a) 60mm, (b) 90mm

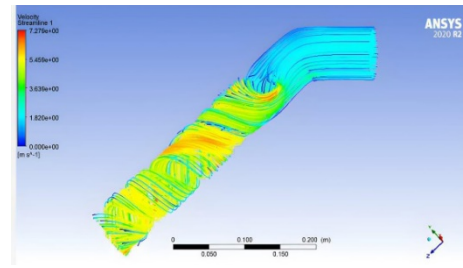
Karakteristik aliran *heliks* (*swirling flow*) dianalisis lebih lanjut melalui visualisasi *streamline* pada Gambar 7. Perbandingan antara kedua variasi menunjukkan perbedaan intensitas energi kinetik yang kontras.

Konfigurasi 60 mm Gambar 7(a) menunjukkan pola garis arus yang lebih rapat dan kontinu dengan magnitudo kecepatan hingga 10,93 m/s. Pola spiral yang konsisten ini memfasilitasi distribusi tekanan yang lebih merata pada permukaan sudu, sehingga meminimalisir potensi *energy loss*. Gaya sentrifugal yang dihasilkan juga mendorong fluida secara stabil ke arah luar, mengoptimalkan interaksi kinetik di area kritis.

Konfigurasi 90 mm Gambar 7(b) memperlihatkan penurunan stabilitas aliran dengan kecepatan puncak hanya sebesar 7,279 m/s. Terlihat adanya gradien kecepatan yang melemah pada area transisi setelah bagian spiral. Ketidakteraturan pola *streamline* ini mengonfirmasi timbulnya turbulensi parasitik yang menghambat laju aliran, yang secara langsung berkorelasi dengan penurunan efisiensi termodinamika dan mekanik pada turbin.



(a)



(b)

Gambar 8: *Velocity Streamline* untuk (a) 60mm, (b) 90mm

IV. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi jarak *pitch* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa turbin ulir portabel, terutama terhadap nilai torsi yang dihasilkan. Konfigurasi *pitch* 60 mm menghasilkan performa terbaik dengan nilai torsi sebesar 2,083 Nm, sedangkan *pitch* 90 mm hanya menghasilkan torsi sebesar 1,337 Nm.

Perbedaan performa tersebut dipengaruhi oleh karakteristik aliran fluida pada masing-masing konfigurasi. *Pitch* 60 mm mampu menghasilkan distribusi tekanan yang lebih merata, pola aliran yang lebih stabil, serta interaksi fluida dengan sudu yang lebih efektif. Kondisi ini menyebabkan transfer energi kinetik air menuju energi mekanik berlangsung secara optimal sehingga torsi yang dihasilkan menjadi lebih besar.

Sebaliknya, penggunaan *pitch* 90 mm menyebabkan terbentuknya daerah turbulensi dan *wake* yang lebih besar di sekitar sudu. Fenomena tersebut mengakibatkan sebagian energi aliran hilang sebelum dikonversi menjadi gaya putar turbin. Akibatnya, efisiensi hidrodinamik turbin mengalami penurunan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *pitch* yang lebih rapat lebih sesuai untuk turbin ulir portabel pada kondisi head rendah dan debit kecil. Konfigurasi *pitch* 60 mm direkomendasikan sebagai desain yang

lebih optimal karena mampu meningkatkan performa torsi dan memperbaiki efektivitas konversi energi pada sistem pembangkit listrik tenaga air skala kecil.

(Switzerland), 12(18).
<https://doi.org/10.3390/SU12187352>

Daftar pustaka

- Almuchizzun, D., Danial,), Romario,), Wicaksono, A., Program,), Mesin, S. T., Tanjungpura, U., Prof, J., & Nawawi, H. H. (2023). Analisis Desain Blade Turbin Air Mikrohidro Archimedes Screw Terapung Berbasis CFD. In *Danial & Wicaksono* (Vol. 4, Number 1).
- Dellinger, G., Simmons, S., Lubitz, W. D., Garambois, P. A., & Dellinger, N. (2019). Effect of slope and number of blades on Archimedes screw generator power output. *Renewable Energy*, 136, 896–908.
<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.01.060>
- Nuernbergk, D., & Rorres, C. (2013). Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139, 213–220.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000661](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000661)
- Nuridin, A., Magister, P., Mesin, J. T., Aries, D., Jurusan, H., & Mesin, T. (2018). Kajian Teoritis Uji Kerja Turbin Archimedes Screw Pada Head Rendah. *Jurnal SIMETRIS*, 9(2).
- Rohit, M. V., & Mohan, S. V. (2016). Tropho-metabolic transition during *Chlorella* sp. cultivation on synthesis of biodiesel. *Renewable Energy*, 98, 84–91.
<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.03.041>
- YoosefDoost, A., & Lubitz, W. D. (2020). Archimedes screw turbines: A sustainable development solution for green and renewable energy generation-a review of potential and design procedures. *Sustainability*