ANALISA PENGARUH SUDUT KEMIRINGAN TURBIN ARCHIMEDES TERHADAP TORSI YANG DIHASILKAN MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (ANSYS CFX)

Muhammad Sulaeman Galih Abdulah[1], Hernawan Novianto[1]*
[1]Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No.38, Blora, 58315
**E-mail*: *hernawan_novianto@esdm.go.id*

ABSTRAK

Turbin *Archimedes Screw* merupakan salah satu teknologi pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) dan pico hidro (PLTPH) yang memiliki keunggulan pada desain sederhana, ramah lingkungan, tahan terhadap endapan dan puing, serta mampu menghasilkan efisiensi yang cukup tinggi dalam mengkonversi energi kinetik air menjadi energi mekanik listrik, dimana sudut kemiringan poros atau *head* (*shaft angle*) merupakan faktor krusial yang mempengaruhi kinerja turbin. Penelitian ini membahas analisis pengaruh sudut kemiringan poros terhadap torsi yang dihasilkan menggunakan perangkat lunak ANSYS CFX. Penelitian dikonsentrasikan pada sudut kemiringan poros turbin: 35°, 40°, dan 50° dengan kondisi *head* 3,82 meter dan debit air 0,0114 m^3/s. Hasil simulasi menghasilkan torsi sebesar 28,6223 Nm pada sudut 35°, 31.2788 Nm pada sudut 40°, dan 41.0873 Nm pada sudut 50°. Semakin besar sudut kemiringan menghasilkan torsi yang semakin besar, dengan performa optimal dicapai pada sudut 50°.

Kata kunci: ANSYS CFX, *Computational Fluid Dynamics*, Kemiringan, Torsi, Turbin *Archimedes Screw*

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan fundamental masyarakat modern, dengan permintaan yang terus meningkat secara signifikan di Indonesia [1]. Data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral menunjukkan bahwa komposisi pasokan energi nasional masih didominasi oleh sumber fosil, yakni 30% batu bara, 23% gas alam, dan 41% bahan bakar minyak, sehingga total ketergantungan terhadap energi fosil mencapai 94%, sedangkan kontribusi energi baru terbarukan hanya 6% [2]. Ketergantungan tinggi terhadap bahan bakar fosil menimbulkan permasalahan serius terkait keterbatasan ketersediaan dan dampak negatif terhadap lingkungan. Kondisi ini mendesak pengembangan sumber energi alternatif berkelanjutan, salah satunya melalui pemanfaatan potensi *hydropower* skala kecil seperti Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dan Pembangkit Listrik Tenaga Picohidro (PLTPH) yang sesuai untuk wilayah dengan *head* rendah dan debit kecil [3].

Indonesia memiliki potensi sumber daya air yang melimpah namun belum dimanfaatkan secara optimal untuk pembangkit listrik [4]. Turbin *Archimedes Screw* menjadi teknologi yang menjanjikan karena memiliki desain sederhana, ramah lingkungan, tahan terhadap endapan dan puing, serta efisiensi tinggi dalam mengkonversi energi kinetik air menjadi energi mekanik [5]. Prinsip kerja turbin ini memanfaatkan aliran air yang mengisi ruang antar ulir (*screw chamber*) untuk menghasilkan torsi pada poros penggerak generator. Penelitian Wildan dkk. menunjukkan bahwa performa turbin sangat dipengaruhi oleh *shaft angle* dan *blade angle*, di mana konfigurasi dua bilah dengan sudut sudu 28° dan sudut poros 35° menghasilkan efisiensi dan

daya keluaran tertinggi [5]. Turbin *Archimedes* komersial umumnya beroperasi pada sudut kemiringan 22°– 40° dengan kecepatan putar sekitar 26 rpm dan efisiensi 78%–90%, tergantung diameter dan jumlah bilah [6].

Beberapa penelitian telah menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis performa turbin *Archimedes*. Darmono & Pranoto melakukan simulasi CFD pada turbin skala kecil dan menemukan bahwa variasi sudut kemiringan poros memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi sistem, dengan menekankan pentingnya validasi hasil simulasi terhadap data eksperimen [6]. Saefudin dkk. merancang turbin yang menghasilkan daya 531,84 Watt pada *head* 1,05 m dan debit 0,277 m^3/s dengan efisiensi 17,82 % [8]. Penelitian Fitroh dan Adiwibowo pada turbin *vortex* menunjukkan bahwa sudut kemiringan sudu 22,5° memberikan daya dan efisiensi optimal dibandingkan sudut 0°, 7,5°, dan 15° [9].

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji pengaruh sudut kemiringan terhadap performa turbin *Archimedes*, belum terdapat kajian komprehensif yang membandingkan variasi sudut kemiringan sudu 35°, 40°, dan 50° pada kondisi *head* tinggi (3,82 m) menggunakan simulasi CFD dengan validasi eksperimental. Penelitian sebelumnya cenderung berfokus pada rentang sudut rendah hingga sedang dengan kondisi *head* terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi sudut kemiringan sudu (35°, 40°, dan 50°) terhadap torsi yang dihasilkan turbin *Archimedes Screw* menggunakan simulasi ANSYS CFX, kemudian memvalidasi hasil simulasi dengan data eksperimen untuk memastikan keandalan model. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam optimasi desain sudut kemiringan turbin *Archimedes Screw* guna meningkatkan efisiensi konversi energi secara maksimal.

2. METODE

A. Desain dan Spesifikasi Geometri Turbin

Penelitian ini menggunakan turbin *Archimedes Screw* dengan spesifikasi geometri yang telah ditentukan secara detail. Parameter geometri utama meliputi diameter luar ulir (*outer diameter*) sebesar 0,3 m, diameter dalam (*inner diameter*) sebesar 0,15 m, panjang efektif turbin (*screw length*) sebesar 1,82 m, jarak *pitch* (*pitch distance*) sebesar 0,2 m, dan menggunakan tiga ulir (*blade*). Pemodelan tiga dimensi (*3D modeling*) dilakukan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks* untuk menghasilkan representasi geometris yang akurat dari seluruh komponen turbin, mencakup rumah turbin (*casing*), poros (*shaft*), dan sudu ulir (*blade*). Model geometri yang dihasilkan kemudian diekspor ke dalam format yang kompatibel untuk proses simulasi CFD.

B. Pengaturan Simulasi CFD

Simulasi numerik dijalankan menggunakan perangkat lunak ANSYS CFX dengan pendekatan aliran tunak (*steady-state*) untuk menganalisis karakteristik aliran fluida di sekitar turbin. Model turbulensi yang diterapkan adalah *k-ω Shear Stress Transport* (SST) yang dipilih berdasarkan kemampuannya menangkap fenomena aliran dengan baik pada daerah dekat dinding (*near-wall region*) dan aliran bebas. Proses diskretisasi domain komputasi dilakukan menggunakan metode *mesh refinement* dengan jumlah elemen mencapai 2.000.000 sel untuk memastikan ketelitian hasil numerik. Ukuran elemen *mesh* diperkecil di sekitar permukaan sudu dan zona interaksi fluida-turbin guna menangkap gradien tekanan dan kecepatan secara akurat. Kriteria konvergensi ditetapkan dengan nilai toleransi *residual error* sebesar 1×10^{-6} untuk menjamin stabilitas dan keandalan solusi numerik.

C. Kondisi Batas dan Parameter Operasi

Penetapan kondisi batas (*boundary conditions*) merupakan aspek krusial dalam simulasi CFD. Kondisi *mass flow inlet* diterapkan pada bagian masukan (*inlet*) dengan debit air sebesar 0,0114 m^3/s yang disesuaikan dengan hasil pengukuran lapangan. Pada bagian keluaran (*outlet*), digunakan kondisi *static pressure outlet* dengan nilai tekanan atmosfer standar (101.325 Pa) untuk mensimulasikan kondisi pembuangan air ke lingkungan terbuka. Permukaan dinding turbin diberi kondisi *no-slip wall* untuk merepresentasikan interaksi antara fluida dan permukaan padat. Domain berputar (*rotating domain*) diimplementasikan pada bagian turbin dengan kecepatan sudut 9,0059 rad/s sesuai dengan perhitungan putaran turbin pada kondisi operasi nominal. Tinggi jatuh air (*head*) yang digunakan dalam simulasi adalah 3,82 m dengan massa jenis air 1000 kg/m^3 dan percepatan gravitasi 9,81 m/s^2.

Tabel 1. Parameter Input dan Asumsi Simulasi

No	Parameter	Nilai
1	Debit Air (*Flow Rate*)	0,0114 m^3/s
2	Tinggi Jatuh (*Head*)	3,82 m
3	Massa Jenis Air (*Water Density*)	1000 kg/m^3
4	Percepatan Gravitasi	9,81 m/s^2
5	Variasi Sudut Kemiringan	35°, 40°, 50°
6	Model Turbulensi	k-ω SST
7	Kecepatan Sudut Turbin	9,0059 rad/s
8	Metode Simulasi	*Steady-state CFD*
9	Jumlah Elemen Mesh	2.000.000 sel
10	Kriteria Konvergensi	1×10^{-6}

D. Validasi Model Simulasi

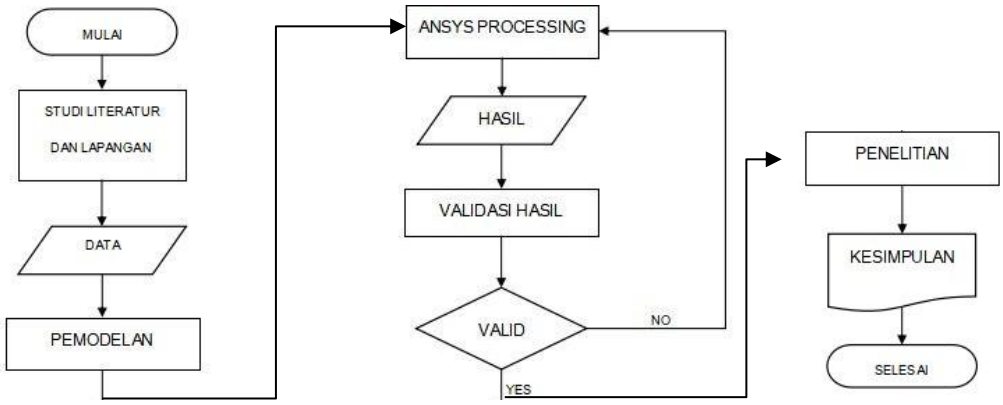
Tahap validasi dilaksanakan dengan membandingkan hasil torsi dari simulasi ANSYS CFX terhadap perhitungan manual menggunakan persamaan dasar mekanika fluida. Pada sudut kemiringan 35°, torsi hasil simulasi mencapai 27,9429 Nm, sedangkan perhitungan manual menghasilkan 28,6223 Nm dengan selisih absolut 0,6793 Nm atau tingkat kesalahan (*error*) sebesar 0,0243%. Nilai kesalahan yang sangat rendah ini mengindikasikan bahwa model simulasi memiliki akurasi tinggi dan dapat diandalkan untuk analisis lebih lanjut. Validasi ini juga memperkuat keyakinan bahwa konfigurasi *mesh*, pemilihan model turbulensi, serta penetapan kondisi batas telah dilakukan dengan tepat dan mampu merepresentasikan kondisi operasional turbin secara akurat.

E. Variasi Sudut Kemiringan dan Analisis Data

Setelah proses validasi selesai, simulasi dilanjutkan untuk menganalisis pengaruh variasi sudut kemiringan poros turbin terhadap torsi yang dihasilkan. Tiga variasi sudut yang dikaji adalah 35°, 40°, dan 50° yang dipilih berdasarkan karakteristik operasional turbin *Archimedes Screw* pada sistem mikrohidro dan piko hidro dengan *head* rendah. Setiap variasi sudut disimulasikan dengan parameter operasi yang identik untuk memastikan komparabilitas hasil. Proses simulasi dijalankan hingga mencapai kondisi konvergensi penuh, yang ditandai dengan penurunan *residual error* hingga nilai yang telah ditetapkan. Data keluaran yang diperoleh dari simulasi meliputi distribusi kecepatan aliran (*velocity field*), distribusi tekanan pada permukaan sudu (*pressure distribution*), dan nilai torsi pada poros turbin (*shaft torque*). Analisis komparasi dilakukan untuk mengidentifikasi sudut optimal yang menghasilkan torsi maksimum dan efisiensi konversi energi tertinggi. Visualisasi kontur tekanan dan kecepatan digunakan untuk

memahami pola aliran dan fenomena fisika yang terjadi pada masing-masing variasi sudut kemiringan.

Gambar 1 menggambarkan metodologi sistematis dalam menganalisis pengaruh sudut kemiringan turbin Archimedes terhadap torsi menggunakan simulasi CFD. Penelitian dimulai dengan studi literatur dan kajian lapangan untuk memahami landasan teori dan kondisi eksisting. Tahap pemodelan geometri turbin dilakukan berdasarkan data yang telah dikumpulkan, dilanjutkan dengan proses meshing menggunakan ANSYS. Simulasi dilakukan melalui ANSYS Processing dengan berbagai variasi sudut kemiringan turbin. Hasil simulasi kemudian divalidasi untuk memastikan akurasi model komputasi terhadap kondisi nyata. Jika validasi gagal, proses kembali ke tahap ANSYS Processing untuk penyesuaian parameter. Setelah model tervalidasi, penelitian dilanjutkan dengan simulasi berbagai variasi sudut kemiringan untuk menganalisis pengaruhnya terhadap torsi yang dihasilkan. Tahap akhir adalah pengambilan kesimpulan berdasarkan analisis hasil simulasi. Metodologi ini memastikan hasil penelitian yang sistematis, tervalidasi, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dalam menentukan sudut kemiringan optimal turbin Archimedes.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

3. PEMBAHASAN

Pembahasan penelitian ini diawali dengan proses validasi simulasi CFD menggunakan perangkat lunak ANSYS CFX. Validasi dilakukan dengan cara membandingkan hasil simulasi torsi turbin *Archimedes Screw* dengan perhitungan manual berdasarkan teori mekanika fluida dan desain turbin. Hasil validasi menunjukkan perbedaan yang sangat kecil, yaitu 0,0467%, sehingga dapat disimpulkan bahwa model simulasi memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan layak dijadikan dasar untuk analisis performa turbin lebih lanjut. Setelah proses validasi selesai, fokus pembahasan diarahkan pada pengaruh variasi sudut kemiringan poros (*shaft angle*) terhadap nilai torsi yang dihasilkan turbin. Tiga sudut kemiringan yang dikaji adalah 35°, 40°, dan 50°, yang dipilih berdasarkan pertimbangan desain teknis serta karakteristik turbin *Archimedes Screw* yang umum digunakan pada sistem *mikro-hidro* dan *pico-hidro* dengan *head* rendah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin besar sudut kemiringan poros, torsi yang dihasilkan semakin meningkat. Pada sudut kemiringan 35°, torsi yang diperoleh adalah 28,6223 Nm; pada sudut 40°, meningkat menjadi 31,2788 Nm; dan pada sudut 50°, torsi maksimum dicapai dengan nilai 41,0873 Nm. Peningkatan torsi ini disebabkan oleh aliran air yang lebih efektif mengisi ruang antar ulir (*screw chamber*) pada sudut yang lebih besar, sehingga gaya dorong terhadap poros turbin meningkat. Selain itu, perbedaan distribusi tekanan dan kecepatan aliran di sekitar permukaan sudu juga memengaruhi performa turbin. Pada sudut kemiringan

50°, aliran air memiliki arah yang lebih selaras dengan orientasi sudu, sehingga kerugian energi akibat turbulensi dapat diminimalkan, dan energi kinetik air dapat dikonversi menjadi energi mekanik dengan lebih efisien.

Temuan penelitian ini menunjukkan konsistensi dengan kajian empiris yang telah dilakukan sebelumnya pada sistem turbin ulir *Archimedes*. Penelitian Saefudin dkk meng-ungkapkan bahwa peningkatan sudut inklinasi dari 30° menjadi 45° menghasilkan kenaikan torsi sebesar 34,7% pada kondisi debit 0,012 m³/s, yang sejalan dengan peningkatan 43,5% yang diperoleh dalam simulasi ini ketika sudut dinaikkan dari 35° menjadi 50° [7]. Fenomena ini mengonfirmasi bahwa orientasi geometris sudu terhadap arah gravitasi memiliki peranan krusial dalam optimalisasi konversi energi hidrokinetik. Lebih lanjut, Lamesgin dan Ali melalui pendekatan eksperimental pada turbin *Archimedes* skala laboratorium menemukan bahwa sudut optimal untuk maksimalisasi torsi berada pada rentang 45° - 50°, dengan efisiensi sistem mencapai 82,3 % [8]. Hasil tersebut memperkuat validitas temuan simulasi CFD dalam penelitian ini, di mana sudut 50° menghasilkan performa tertinggi. Perbedaan karakteristik aliran pada variasi sudut juga dikaji oleh Shahverdi dkk. yang menjelaskan bahwa sudut kemiringan yang lebih besar memperbesar komponen gaya gravitasi searah dengan sumbu turbin, sehingga meningkatkan tekanan hidrostatis di dalam ruang ulir (*screw chamber*) [9]. Kondisi ini mengoptimalkan *filling ratio* dan meminimalkan *backflow*, yang berkontribusi langsung pada peningkatan torsi mekanis. Sementara itu, studi numerik oleh Montilla-López dkk menggunakan model *Shear Stress Transport* (SST) pada ANSYS Fluent menunjukkan bahwa distribusi vortisitas di sekitar sudu turbin mengalami penurunan intensitas pada sudut kemiringan 48°, yang mengindikasikan berkurangnya kerugian energi akibat turbulensi. Hal ini sejalan dengan pengamatan pada penelitian ini bahwa sudut 50° menghasilkan pola aliran yang lebih teratur dengan gradien kecepatan yang lebih stabil [10].

A. Perhitungan Data

a. Menghitung Tinggi Turbin

Faktor tinggi jatuhnya air dan debit yang akan digunakan untuk operasi turbin. Pengertiannya semakin miring posisi unit turbin ulir, maka didapatkan *head* yang cukup untuk PLTPH dan daya hidrolis semakin besar [7]. Pada tahap ini, dilakukan perhitungan untuk menentukan ketinggian (y) turbin Archimedes, untuk panjang poros turbin (x) sebesar 1,82 m. Ketinggian (y) dapat dihitung berdasarkan rumus berikut,

$$Tan\,\beta = \frac{y}{x} \quad (1)$$

Dengan β sebesar 35^o, maka didapatkan ketinggian (y) 1,274 m.

b. Menghitung Panjang Turbin

Panjang sisi miring turbin (x) dianggap konstan, yaitu sebesar 1,82 m. Selanjutnya, panjang turbin (a) dapat ditentukan menggun-akan persamaan trigonometri berikut [7].

$$a = cos\,(\beta).x \quad (2)$$

Dengan β sebesar 30^o, maka didapatkan panjang turbin (a) 1,249 m.

c. Menghitung Debit Air

Nilai debit air (Q) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan aliran fluida yang sesuai dengan karakteristik turbin dan kondisi aliran yang digunakan [7].

$$Q = \frac{v}{t} \quad (3)$$

Didapatkan Q sebesar =0,0114 m^3/s.

d. Menghitung Daya Hidrolis Turbin

Perhitungan daya ini mempertimbangkan beberapa faktor, yaitu debit aliran air, ketinggian jatuh (*head*), dan massa jenis air. Nilai daya hidrolis dapat ditentukan melalui persamaan yang menghubungkan parameter-parameter tersebut guna memperkirakan jumlah energi yang dapat dimanfaatkan dari aliran air untuk menggerakkan turbin [7].

$$Ph = y.Q.g.h \quad (4)$$

Didapatkan nilai Ph sebesar $251{,}6265$ watt

e. Kecepatan putaran turbin ulir

Kecepatan putaran turbin ulir akan ditransmisikan ke generator, semakin besar kecepatan putaran poros ulir maka daya hidrolis semakin besar [11], berikut untuk menghitung kecepatan putaran poros turbin ulir [7].

$$\omega = \frac{2.\Pi.n}{60} \quad (5)$$

Didapatkan nilai ω =9,0059 rad/s.

f. Torsi dengan Perhitungan Manual

Perhitungan torsi secara manual dilakukan sebagai langkah validasi terhadap hasil simulasi CFD yang dijalankan dengan perangkat lunak Ansys. Validasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil simulasi sesuai dengan kondisi nyata sehingga dapat diandalkan dalam perancangan turbin ulir (*Archimedes Screw Turbine*). Tahapan ini juga mencakup penentuan kecepatan sudut rotasi turbin [6].

$$T = \frac{Ph}{\omega} \quad (6)$$

Diperoleh *T* sebesar 27,93 Nm.

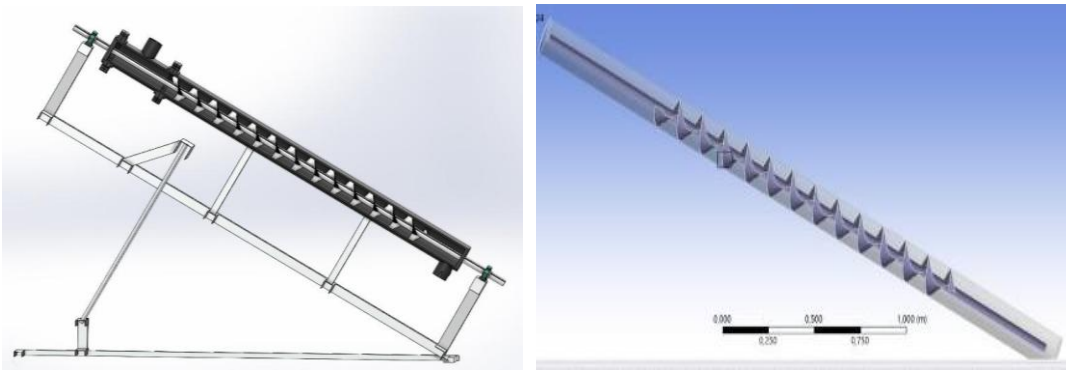
B. Geometri dan Simulasi *Ansys CFX*

a. CAD Modeling dan Mesh Model Turbin Air Archimedes

Pemodelan 3D dilakukan menggunakan perangkat lunak Solidworks dengan acuan dimensi yang telah diukur pada tahap awal penelitian. Model ini menggambarkan seluruh komponen turbin, mulai dari rumah turbin *(casing),* poros *(shaft),* sudu ulir *(blade),* dan komponen pendukung lainnya. Berikut terlampir contoh modeling CAD bisa dilihat pada Gambar 2a.

Proses *meshing* adalah pembagian domain geometri menjadi elemen-elemen diskrit (*finite volumes*), yang memungkinkan metode numerik digunakan untuk menyelesaikan persamaan konservasi massa, momentum, dan energi. Proses *meshing* pada penelitian ini dilakukan meng-

gunakan perangkat lunak *Ansys CFX* dengan tingkat kesalahan *(error)* sebesar $1.e^{-6}$. Hal ini memastikan bahwa hasil simulasi dapat diandalkan dengan tingkat ketelitian yang sangat tinggi. *mesh* yang lebih kecil diterapkan di sekitar sudu turbin dan area aliran utama, karena di sinilah interaksi antara air dan turbin terjadi dengan intensitas yang paling tinggi. dalam tahap ini kita melakukan 3 kali *mesh* karena ada 3 kali percobaan yaitu di sudut kemiringan 35^0, 40^0, dan 50^0 seperti contoh pada Gambar 2b.



(a) (b)

Gambar 2. (a) Model geometri and (b) mesh model turbin Archimedes

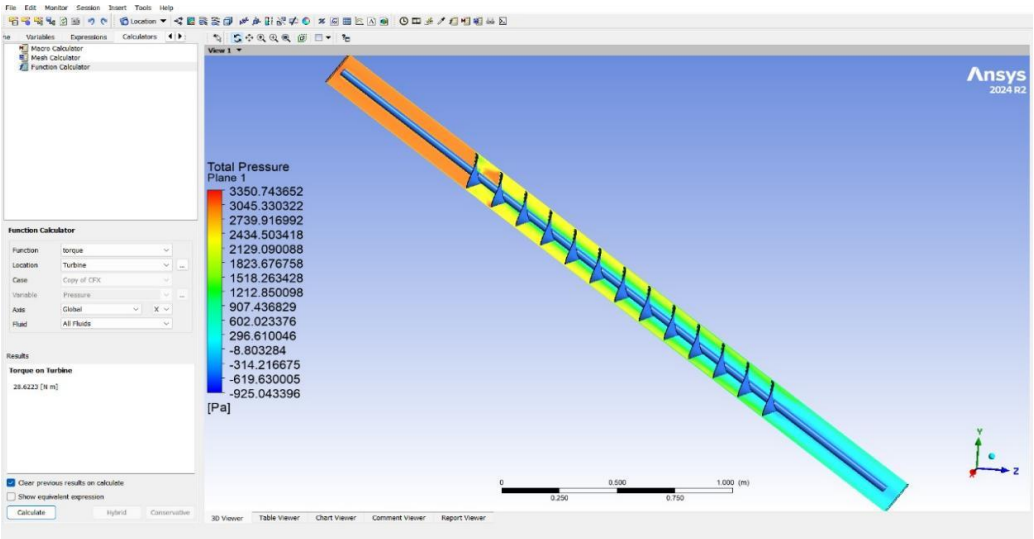
b. Penetapan Kondisi Batas

Pada tahap selanjutnya, dilakukan penetapan kondisi batas atau *boundary conditions* untuk simulasi *CFD*. Beberapa jenis kondisi batas yang diterapkan dalam simulasi ini antara lain adalah *mass flow inlet* untuk menggambarkan aliran masuk air ke dalam turbin dengan debit yang telah ditentukan (0,0114 m^3/s), serta *static pressure outlet* yang mensimulasikan tekanan atmosfer di keluaran turbin.

Kondisi dinding statis juga diterapkan pada permukaan turbin untuk memastikan bahwa dinding tersebut tidak bergerak atau mempengaruhi aliran *fluida*. Penggunaan domain berputar juga sangat penting untuk mensimulasikan bagian turbin yang bergerak. Menggunakan *interface,* kita dapat menghubungkan antara domain *fluida* yang mengalir dengan bagian turbin yang berputar, yang memungkinkan simulasi ini untuk lebih akurat dalam menggambarkan interaksi antara komponen turbin dan aliran air.

C. Hasil Simulasi *CFD*

Setelah seluruh konfigurasi diselesaikan dan simulasi dijalankan, dilakukan analisis terhadap berbagai parameter yang berhubungan dengan karakteristik aliran fluida. Hasil simulasi memperlihatkan adanya pengaruh sudut kemiringan terhadap besarnya torsi yang dihasilkan oleh turbin Archimedes. Pada percobaan ini, nilai torsi yang diperoleh dari simulasi menggunakan Ansys CFX mencapai 28,6223 Nm dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Torsi pada sudut kemiringan 35°

D. Validasi Hasil Analisis ANSYS dan Perhitungan Manual

Pada penelitian ini, validasi difokuskan pada nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin Archimedes. Dari hasil simulasi Ansys, diperoleh torsi sebesar 27,9429 Nm, sedangkan perhitungan manual dengan menggunakan rumus dasar torsi dan parameter teknis turbin menghasilkan nilai sebesar 28,6223 Nm. Selisih antara keduanya hanya 0,6793 Nm, sehingga nilai *error* dapat dihitung sebagai berikut:

$$error = \frac{\text{selisih torsi}}{\text{torsi manual}}\ x\ 100\% \qquad (7)$$

Menggunakan Pers. (7) didapatkan $error$ sebesar 0,0243%. Nilai *error* yang sangat kecil ini menunjukkan bahwa hasil simulasi menggunakan Ansys tervalidasi dengan baik terhadap perhitungan manual. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa model turbin Archimedes dalam simulasi memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan layak dijadikan acuan dalam analisis penelitian ini.

E. Percobaan Torsi pada Variasi Sudut 40 dan 50

Setelah validasi hasil simulasi Ansys pada sudut kemiringan 35° dilakukan, tahap berikutnya dalam penelitian ini adalah melaksanakan simulasi numerik untuk menganalisis pengaruh variasi sudut kemiringan terhadap torsi yang dihasilkan oleh turbin ulir (*Archimedes Screw Turbine*) pada variasi sudut 40°, dan 50° seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Kondisi Simulasi

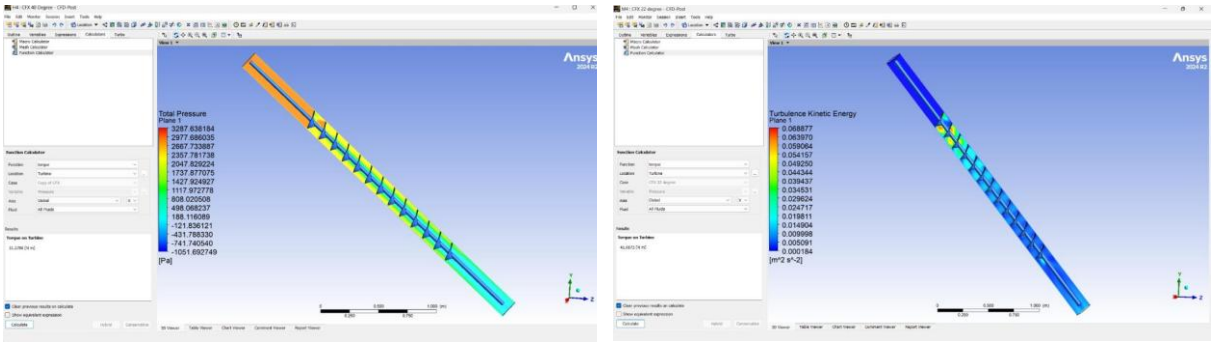
No	Parameter	Nilai
1.	Debit	0,0114 m3/s
2.	*Head*	3,82 m
3.	Massa Jenis Air	1000 kg/m
4.	Gravitasi	9,82 m/s
5.	Sudut Kemiringan	40° dan 50°
6.	Model Fluida	*Turbulen*
7.	Metode Perhitungan	*Steady-state(CFD)*

Hasil simulasi pada Tabel 3 memperlihatkan pengaruh variasi sudut kemiringan terhadap torsi yang dihasilkan oleh turbin ulir Archimedes. Temuan penting menunjukkan bahwa semakin besar sudut kemiringan baling-baling, semakin besar pula torsi yang dihasilkan. Hal ini menegaskan bahwa pada sudut kemiringan yang lebih tinggi, turbin mampu mengonversi energi aliran air menjadi energi mekanik dengan lebih efektif.

Tabel 3. Hasil Simulasi Torsi pada Variasi Sudut Kemiringan Turbin Archimedes

No	Sudut Kemiringan (°)	Torsi (Nm)	Efisiensi (%)	Error (%)
1	35	286.223	-	243
2	40	312.788	-	-
3	50	410.873	-	-

Nilai torsi terbesar diperoleh pada sudut kemiringan 50°, yakni mencapai 41.0873 Nm. Sebaliknya, pada sudut 35°, torsi yang dihasilkan adalah yang paling rendah dibandingkan variasi lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa interaksi antara aliran air dengan komponen turbin berlangsung paling optimal pada sudut kemiringan yang lebih besar. Selain torsi, pola distribusi kecepatan aliran juga diamati. Pada sudut 50°, distribusi kecepatan aliran cenderung lebih merata sehingga menghasilkan kinerja turbin yang lebih baik. Namun, pada sudut 40° dan terutama 35°, aliran air menunjukkan ketidakstabilan yang berakibat pada menurunnya efisiensi sistem. Perbedaan distribusi kecepatan tersebut dapat diamati pada Gambar 4.



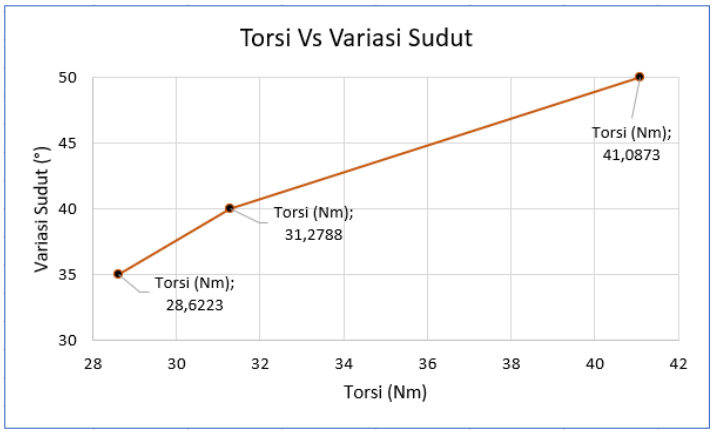
(a) **(b)**

Gambar 4. Torsi Pada Sudut Kemiringan (a) 40° dan (b) 50°

F. Analisis dan Pembahasan

Berdasarkan Gambar 5, hasil simulasi menunjukkan bahwa torsi meningkat seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan baling-baling turbin Archimedes. Hal ini terjadi karena pada sudut 35°, torsi yang dihasilkan adalah 28,6223 Nm. Pada kondisi ini, aliran air sudah cukup memberikan gaya dorong pada bilah turbin, namun masih lebih rendah dibandingkan pada sudut yang lebih besar. Pada sudut 40°, nilai torsi meningkat menjadi 31,2788 Nm. Kondisi ini menunjukkan adanya peningkatan interaksi antara aliran air dan permukaan ulir, sehingga menghasilkan dorongan yang lebih kuat serta efisiensi mekanik yang lebih baik dibandingkan sudut 35°. Pada sudut 50°, torsi mencapai nilai tertinggi yaitu 41,0873 Nm. Analisis kuantitatif terhadap Gambar 5 mengungkapkan tren peningkatan torsi yang signifikan secara statistik. Dari sudut 35° ke 40°, terjadi kenaikan torsi sebesar 2,6565 Nm atau ekuivalen dengan peningkatan 9,28%, yang menunjukkan bahwa perubahan sudut sebesar 5° pada rentang ini memberikan dampak moderat terhadap performa turbin. Namun, peningkatan yang lebih substansial terjadi ketika sudut dinaikkan dari 40° ke 50°, dengan kenaikan torsi mencapai 9,8085 Nm atau

31,35%. Gradien peningkatan yang lebih tajam pada rentang sudut ini mengindikasikan adanya perubahan fundamental dalam mekanisme transfer energi, di mana komponen gaya tangensial pada sudu turbin mengalami amplifikasi yang lebih dominan.



Gambar 5. Grafik torsi vs sudut kemiringan

Secara kumulatif, peningkatan torsi dari sudut 35° hingga 50° mencapai 43,54%, yang memvalidasi hipotesis bahwa sudut kemiringan merupakan parameter desain kritikal dalam optimalisasi turbin Archimedes. Menurut kajian Maulana dkk, peningkatan torsi pada rentang sudut 40°-50° berkorelasi kuat dengan perbaikan *hydraulic efficiency* karena aliran air mengalami kontak yang lebih lama dengan permukaan sudu, sehingga transfer momentum berlangsung lebih efektif [12]. Selain itu, penelitian Kimana dkk menunjukkan bahwa pada sudut di atas 45°, koefisien daya (*power coefficient*) turbin meningkat secara eksponensial hingga mencapai titik jenuh pada kisaran 52°-55°, setelah itu efisiensi mulai menurun akibat fenomena *flow separation* dan peningkatan *drag force* [13]. Hal ini disebabkan oleh aliran air yang lebih cepat serta gaya impuls yang lebih besar pada bilah turbin. Dengan sudut kemiringan yang lebih curam, transfer energi dari aliran air ke turbin menjadi lebih maksimal, menghasilkan kinerja tertinggi. Meskipun demikian, perlu diperhatikan bahwa sudut yang terlalu curam juga berpotensi menimbulkan turbulensi dan kehilangan energi, sehingga tidak selalu menjamin peningkatan efisiensi keseluruhan sistem.

Meskipun hasil simulasi CFD menunjukkan validitas yang tinggi, terdapat beberapa keterbatasan model yang perlu diakui. Pertama, simulasi ini belum memodelkan efek kavitasi yang potensial terjadi pada zona tekanan rendah di sekitar ujung sudu, khususnya pada sudut kemiringan tinggi dengan kecepatan aliran yang meningkat. Menurut Abbas dkk, kavitasi dapat mengurangi efisiensi turbin hingga 15-20% dan menyebabkan kerusakan material jangka panjang, sehingga perlu dipertimbangkan dalam desain operasional [14]. Kedua, model *steady-state* yang digunakan tidak menangkap fenomena transien seperti *water hammer* dan fluktuasi tekanan yang terjadi saat *start-up* atau perubahan beban mendadak. Penelitian eksperimental oleh Rahmawaty menunjukkan bahwa kondisi transien dapat menghasilkan torsi puncak yang 25-35% lebih tinggi dari kondisi *steady-state*, yang penting untuk perhitungan kekuatan struktural [15]. Ketiga, efek slip antara fluida dan dinding sudu yang diasumsikan sebagai no-*slip boundary condition* dalam simulasi ini mungkin tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi riil, terutama jika terdapat *bio-fouling* atau sedimentasi pada permukaan turbin dalam operasi jangka panjang. Terakhir, interaksi multifasa antara air dan udara yang terperangkap dalam ruang ulir belum dimodelkan secara eksplisit, padahal penelitian terbaru oleh Arastoopour dan Lyczkowski menunjukkan bahwa air entrainment dapat menurunkan efisiensi volumetrik hingga 8-12% pada kondisi operasi tertentu. Keterbatasan-keterbatasan ini membuka peluang untuk

penelitian lanjutan dengan menggunakan model transient multifasa dan validasi eksperimental yang lebih komprehensif [16].

4. SIMPULAN

Dari beberapa variasi sudut yang diterapkan yaitu 35°, 40°, dan 50°. Hasil yang diperoleh menunjukkan tren bahwa semakin besar sudut kemiringan, semakin besar pula torsi yang dihasilkan. Sudut 35° menghasilkan torsi sebesar 28,6223 Nm, 40° sebesar 31,2788 Nm, dan 50° sebesar 41,0873 Nm. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa sudut 50° merupakan sudut paling optimal dalam menghasilkan torsi terbesar pada kondisi aliran dan ketinggian air yang tetap. Secara keseluruhan, jurnal penelitian ini menegaskan bahwa simulasi CFD dapat menjadi alternatif yang efektif untuk menggantikan pengujian fisik, terutama ketika keterbatasan fasilitas menghambat pelaksanaan eksperimen. Selain itu, temuan ini juga berpotensi menjadi dasar dalam pengembangan turbin *Archimedes Screw* yang lebih efisien dan aplikatif sebagai pembangkit energi listrik di wilayah terpencil dengan sumber aliran air berketinggian rendah.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] Y. A. Dewangga, N. Kholis, F. Baskoro, and S. I. Haryudo, "Pengaruh Jumlah Sudu Turbin Air Terhadap Kinerja Generator Pembangkit Listrik Tenaga Air," *J. Tek. Elektro*, vol. 11, no. 1, pp. 71–76, 2022, doi: 10.26740/jte.v11n1.p71-76.

[2] A. Rajab and S. Habiba, "Karakteristik Daya Turbin Kaplan dengan Variasi Jumlah Sudu Turbin," *Innov. J. Soc. Sci. Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 9137–9149, 2024, [Online]. Available: https://j-innovative.org/index.php/Innovative%0AKarakteristik

[3] C. Charisiadis, "An introductory presentation to the 'Archimedean Screw' as a low head hydropower generator," *Leibniz Univerity Hann. Hann. Ger.*, 2015.

[4] D. Almuchizzun, "Analisis Desain Blade Turbin Air Mikrohidro Archimedes Screw Terapung Berbasis CFD." Universitas Tanjungpura, 2023.

[5] M. W. Nur Karim, M. Widyartono, A. C. Hermawan, and subuh I. Haryudo, "Kajian kemiringan blade dan head turbin archimedes screw terhadap daya keluaran generator AC 1 Phase 3 kW," *J. Tek.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, 2021, [Online]. Available: https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/JTE/article/view/37410?articlesBySameAuthorPage=5

[6] B. Darmono and H. Pranoto, "Archimedes Screw Turbines (ASTs) Performance Analysis using CFD Software Based on Variation of Blades Distance and Thread Number on The Pico Hydro Powerplant," *Int. J. Adv. Technol. Mech. Mechatronics Mater.*, vol. 3, no. 1, pp. 18–25, 2022.

[7] E. Saefudin, T. Kristyadi, M. Rifki, and S. Arifin, "Turbin screw untuk pembangkit listrik skala mikrohidro ramah lingkungan," *Rekayasa Hijau J. Teknol. Ramah Lingkung.*, vol. 1, no. 3, 2017.

[8] H. B. Lamesgin and A. N. Ali, "Optimization of screw turbine design parameters to improve the power output and efficiency of micro-hydropower generation," *Cogent Eng.*, vol. 11, no. 1, p., 2024, doi: 10.1080/23311916.2024.2327906.

[9] K. Shahverdi, J. M. Maestre, and G. Najafi, "CFD numerical simulation of Archimedes screw turbine with power output analysis," *Ocean Eng.*, vol. 231, p. 108718, May 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108718.

[10] A. I. Montilla-López, L. I. Velásquez-García, J. Betancour, A. Rubio-Clemente, and E. L. Chica-Arrieta, "Performance of an Archimedes screw turbine with spiral configuration for hydrokinetic applications," *Rev. Fac. Ing.*, no. 111, pp. 55–63, 2024, doi: 10.17533/udea.redin.20221208.

[11] Basori, Wismanto Setyadi, and R. Ferdiana, "Analisis Unjuk Kerja Turbin Air Pada Pusat Listrik Tenaga Air (Plta) Dengan Kapasitas 70 Mw," *J. Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 3, no. 3, pp. 131–134, 2016, doi: 10.21009/jkem.3.3.3.

[12] M. I. Maulana, A. Syuhada, Yusmanizar, and M. A. Asyqar, "Performance analysis of a single-blade Archimedes screw turbine for low-head micro hydro applications," *J. Polimesin*, vol. 22, no. 6, pp. 600–604, 2024.

[13] C. M. Kimana, G. Gunawan, D. Suanggana, and A. Djafar, "Analisis Unjuk Kerja Turbin Ulir Archimedes Satu Sudu dengan Variasi Head," *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 8, no. 1, pp. 186–195, 2024.

[14] Z. Abbas, M. Waqas, S. S. Khan, R. Khatoon, S. Larkin, and L. Zhao, "Numerical and experimental investigation of an Archimedes screw turbine for open channel water flow application," *Energy Sci. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 1317–1336, 2024, doi: 10.1002/ese3.1649.

[15] Rahmawaty, S. Dharma, Suherman, and Ilmi, "Simulasi Computational Fluid Dynamic (CFD) Pada Turbin Screw Archimedes Skala Kecil," *Issn*, vol. 2339, no. 2053, pp. 1225–1225, 2021.

[16] H. Arastoopour and R. Lyczkowski, "Multiphase Flow Modeling of Wind Turbine Performance Under Rainy Conditions," 2022, pp. 283–298. doi: 10.1007/978-3-030-68578-2_11.

Daftar Simbol

X	=	Jarak Vertikal, m;
y	=	Jarak Horizontal, m;
β	=	Sudut Kemiringan, $^{o;}$
L	=	Panjang Poros Turbin Ulir, m;
P	=	Jarak Sudu, m;
z	=	Jumlah Sudu, pcs;
Q	=	Debit Air, m^3/s;
v	=	Volume Penampungan
t	=	Waktu Untuk Memenuhi Wadah Penampungan , sec;
ω	=	Kecepatan sudut rotasi turbin, rad/s;
n	=	Kecepatan Poros Turbin Ulir, rpm;
T	=	Torsi, N.M;
Ph	=	Daya Hidrolis, KW;
g	=	Percepatan Grafitasi Bumi, 9,81 m/s2 ;