

ANALISIS *FLUID STRUCTURE INTERACTION* PADA TURBIN GORLOV

*Muhammad Akmal Daffaroihan¹, Syaiful², Achmad Widodo²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: akmaldaffa1204@gmail.com

Abstrak

Pemanfaatan energi baru terbarukan melalui Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL) mendorong pengembangan turbin Gorlov sebagai salah satu *Vertical Axis Water Turbine* (VAWT) yang memiliki keunggulan pada kondisi aliran rendah, namun interaksi fluida dan struktur bilah berpotensi menimbulkan tegangan dan deformasi yang memengaruhi keandalan struktur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi tekanan pada bilah turbin, mengevaluasi respon mekanis struktur melalui pendekatan *One-Way Fluid-Structure Interaction* (FSI), serta mengidentifikasi titik kritis berdasarkan tegangan dan deformasi. Metode yang digunakan adalah simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk memperoleh distribusi tekanan pada variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) yang kemudian dipetakan ke analisis struktur menggunakan *Finite Element Method* (FEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi tekanan dipengaruhi oleh variasi TSR dengan tekanan maksimum terjadi pada sisi depan bilah, tegangan dan regangan maksimum terlokasi pada sambungan antara bilah-plat dan area sekitar poros, serta deformasi maksimum terlokalisasi pada bagian tengah leading edge, namun nilai tegangan maksimum masih berada di bawah batas kekuatan material sehingga struktur dinyatakan aman. Dengan demikian, turbin Gorlov yang dianalisis memiliki karakteristik struktural yang memenuhi kriteria keamanan dan berpotensi untuk diaplikasikan pada sistem PLTAL.

Kata Kunci: kekuatan struktur; simulasi fsi; *tip speed ratio*; turbin gorlov; *von-misses stress*

Abstract

The utilization of renewable energy through marine current power plants encourages the development of the Gorlov turbine as a type of Vertical Axis Water Turbine (VAWT) with advantages in low-flow conditions; however, fluid-structure interaction may induce stress and deformation affecting structural reliability. This study aims to analyze pressure distribution on the turbine blades, evaluate structural mechanical response using a One-Way Fluid-Structure Interaction (FSI) approach, and identify critical points based on stress and deformation. The methodology employs Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations to obtain pressure distribution under various Tip Speed Ratio (TSR) conditions, which are then mapped into structural analysis using the Finite Element Method (FEM). The results show that pressure distribution is significantly influenced by TSR variations, maximum stress and strain are allocated at the connection between the blade-plate and the area around the shaft, and maximum deformation is localized at the center of the leading edge. However, the maximum stress remains below the material strength limit, indicating that the structure is safe. Therefore, the analyzed Gorlov turbine demonstrates adequate structural performance and potential for application in marine current power generation systems

Keywords: *fsi simulation; gorlov turbine; structural strength; tip speed ratio; von-misses stress*

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi global yang masih didominasi oleh bahan bakar fosil menimbulkan berbagai permasalahan, baik dari sisi keberlanjutan sumber daya maupun dampak lingkungan. Data menunjukkan bahwa konsumsi energi berbasis fosil masih menyumbang lebih dari 80% terhadap total konsumsi energi dunia, sehingga mendorong perlunya pengembangan energi baru terbarukan (EBT) sebagai solusi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan [1], [2]. Di Indonesia, ketergantungan terhadap energi fosil juga masih tinggi, meskipun terdapat tren peningkatan pemanfaatan EBT dalam beberapa dekade terakhir [3].

Salah satu potensi EBT yang cukup besar di Indonesia adalah energi arus laut yang dapat dimanfaatkan melalui Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL). Teknologi ini memanfaatkan energi kinetik aliran laut tanpa memerlukan perbedaan tinggi (*head*), sehingga lebih fleksibel untuk diaplikasikan pada wilayah kepulauan seperti Indonesia yang memiliki potensi energi arus laut hingga mencapai 17,9 GW [4]. Dalam sistem PLTAL, turbin hidrokinetik berperan sebagai komponen utama dalam mengonversi energi aliran menjadi energi mekanik yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik [5].

Salah satu jenis turbin yang banyak dikembangkan adalah turbin Gorlov, yang merupakan pengembangan dari turbin Darrieus dengan konfigurasi bilah berbentuk heliks. Desain ini menawarkan beberapa keunggulan, seperti kemampuan *self-starting* yang lebih baik, fluktuasi torsi yang lebih rendah, serta performa yang relatif stabil pada kecepatan aliran rendah [6], [7]. Selain itu, bentuk heliks memungkinkan distribusi gaya yang lebih merata sepanjang bilah dibandingkan dengan turbin bilah lurus.

Meskipun demikian, interaksi antara aliran fluida dan struktur bilah pada turbin Gorlov menghasilkan beban hidrodinamika yang kompleks, yang dapat memicu timbulnya tegangan dan deformasi pada struktur. Kondisi ini berpotensi memengaruhi keandalan dan umur pakai turbin, terutama jika terjadi konsentrasi tegangan pada titik-titik tertentu [8]. Oleh karena itu, analisis kekuatan struktur menjadi aspek penting dalam pengembangan turbin hidrokinetik, tidak hanya dari sisi performa hidrodinamika, tetapi juga dari sisi integritas struktural.

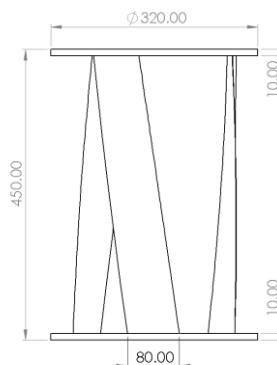
Sejauh ini, sebagian besar penelitian mengenai turbin Gorlov masih berfokus pada optimasi performa hidrodinamika, seperti koefisien daya dan karakteristik aliran, sementara kajian yang secara khusus membahas respon struktural akibat beban fluida masih relatif terbatas. Pendekatan *Fluid-Structure Interaction* (FSI) menjadi metode yang relevan untuk mengkaji fenomena ini, karena mampu menggambarkan hubungan antara distribusi tekanan fluida dengan respon mekanis struktur [9].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respon struktural bilah turbin Gorlov menggunakan pendekatan *One-Way Fluid-Structure Interaction* (FSI). Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) digunakan untuk memperoleh distribusi tekanan pada variasi Tip Speed Ratio (TSR), yang kemudian dipetakan ke dalam analisis struktur menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM). Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat diidentifikasi distribusi tegangan, regangan, serta deformasi pada bilah turbin, sehingga dapat dievaluasi tingkat keamanan struktur dalam kondisi operasional.

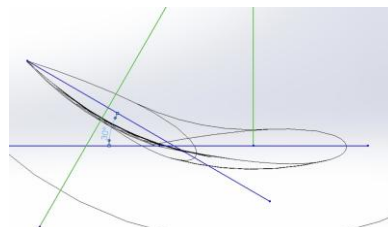
2. Metodologi Penelitian

2.1 Geometri dan Domain Komputasi

Geometri turbin dan domain simulasi dalam penelitian ini mengadopsi parameter dari studi Li dkk. [10]. Perancangan dilakukan melalui perangkat lunak SolidWorks 2023 dengan spesifikasi teknis mencakup penggunaan tiga sudu heliks bersudut 30° dan profil hidrofoil NACA 0018. Turbin memiliki diameter 240 mm dan tinggi 450 mm, serta dilengkapi dengan plat penutup berdiameter 320 mm yang bertujuan untuk mengoptimalkan koefisien daya [11]. Geometri turbin ditunjukkan pada Gambar 1.



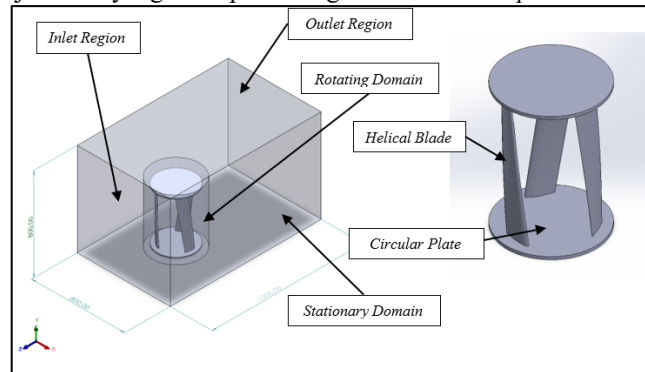
Gambar 1. Dimensi Geometri Turbin Gorlov



Gambar 2. Sudut Heliks Turbin

Domain komputasi untuk analisis aliran fluida pada turbin Gorlov diklasifikasikan menjadi tiga bagian utama: *stationary*, *rotating*, dan *body of influence* (BOI). Pada domain *stationary* diterapkan kondisi batas *no-slip* pada seluruh dinding, kecuali pada sisi *inlet* dan *outlet* sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3. Turbin ditempatkan di dalam domain *rotating* berbentuk silinder. Metode *sliding mesh* diterapkan pada domain *rotating* untuk mensimulasikan pergerakan rotasi turbin guna memperoleh data torsi serta karakteristik aliran yang komprehensif. Selain itu, *body of influence* diposisikan di sekitar turbin untuk meningkatkan resolusi penangkapan fenomena aliran pada area di sekitar sudu. Aliran

air dengan densitas 1025 kg/m^3 dengan kecepatan *inlet* $0,5 \text{ m/s}$ dan intensitas turbulensi 1% . Aliran kemudian melintasi domain sepanjang $1,3 \text{ m}$ menuju *outlet* yang ditetapkan dengan kondisi batas *pressure outlet* pada tekanan atmosfer.



Gambar 3. Domain Komputasi

2.2 Definisi Parameter

Analisis kinerja hidrokinetik pada turbin Gorlov dalam penelitian ini didasarkan pada parameter daya, torsi, *Tip Speed Ratio* (TSR), serta koefisien daya dan koefisien torsi. Penentuan daya (P_{turbine}) dilakukan dengan mengonversi interaksi antara kecepatan rotasi (ω) dan momen torsi (T) melalui prosedur perhitungan yang merujuk pada Persamaan (1).

$$P_{\text{turbine}} = \omega \cdot \tau \quad (1)$$

Kecepatan rotasi turbin ditentukan berdasarkan formulasi *Tip Speed Ratio* (TSR) sebagaimana tercantum dalam Persamaan (2). TSR didefinisikan sebagai rasio antara kecepatan tangensial pada ujung bilah terhadap kecepatan aliran bebas fluida.

$$TSR = \frac{\omega \cdot D}{2 \cdot V} \quad (2)$$

Dalam konteks ini D didefinisikan sebagai diameter turbin, sedangkan V merepresentasikan kecepatan aliran fluida yang berinteraksi dengan permukaan turbin. Perhitungan torsi turbin dilakukan dengan mengintegrasikan variabel gaya tangensial (F) dan jari-jari turbin (r) sebagaimana dijabarkan dalam Persamaan (3).

$$\tau = F \cdot r \quad (3)$$

Dalam penelitian ini, nilai torsi turbin Gorlov diperoleh melalui hasil simulasi numerik. Besaran torsi tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar perhitungan koefisien daya (C_p) dan koefisien torsi (C_τ) sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (4) dan Persamaan (5). Koefisien daya didefinisikan sebagai rasio antara daya mekanis yang dihasilkan turbin terhadap laju energi kinetik dari aliran fluida.

$$C_p = \frac{P_{\text{turbine}}}{P_{\text{air}}} = \frac{\omega \cdot \tau}{0,5 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A} \quad (4)$$

Dalam konteks ini ρ merupakan massa jenis fluida yang berinteraksi dengan permukaan bilah, sedangkan A menyatakan luas area sapuan (*swept area*) turbin. Koefisien torsi (C_τ) merepresentasikan rasio antara torsi yang dihasilkan turbin terhadap torsi teoritis yang diperoleh dari aliran fluida.

$$C_\tau = \frac{\tau_{\text{turbine}}}{\tau_{\text{air}}} = \frac{\tau}{0,25 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot D} \quad (5)$$

2.3 Simulasi Numerik

Kinerja turbin heliks Gorlov dianalisis secara mendalam melalui simulasi numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan ANSYS Fluent 2022. Persamaan RANS dengan model turbulensi *k- ω SST* diterapkan untuk menyelesaikan aliran turbulen yang bersifat *unsteady*, *incompressible*, dan viskos. Untuk memecahkan korelasi antara kecepatan dan tekanan, digunakan algoritma SIMPLE dengan skema diskritisasi *second-order*. Kriteria konvergensi untuk persamaan kontinuitas, momentum, dan turbulensi ditetapkan pada ambang batas residual 10^{-5} .

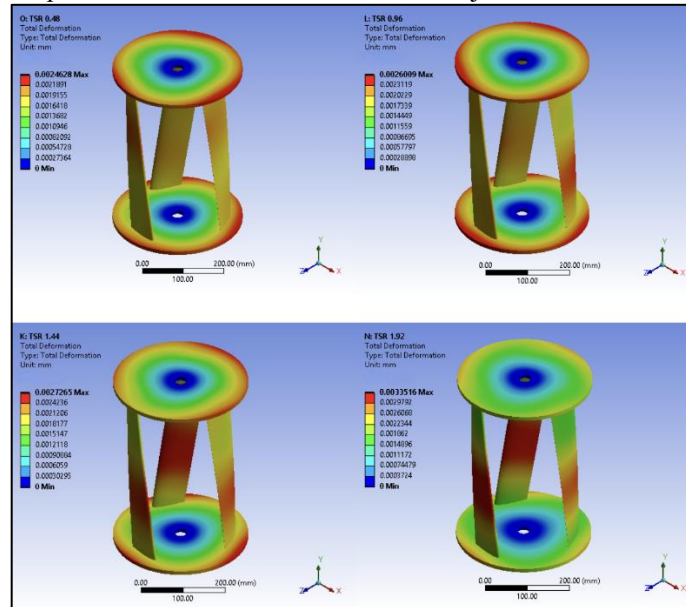
2.4 Validasi

Validasi dilakukan sebagai tahapan krusial untuk menjamin akurasi serta keandalan hasil simulasi. Prosedur validasi dalam studi ini merujuk pada penelitian turbin heliks oleh Li dkk. [10], dengan variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) dan koefisien daya sebagai parameter uji. Berdasarkan hasil validasi, diperoleh rata-rata *error* antara hasil simulasi dan data literatur sebesar $5,21\%$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model simulasi telah memenuhi kriteria validasi dengan ambang batas kesalahan di bawah 10% .

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Total Deformation

Deformasi total merupakan salah satu parameter penting dalam analisis struktur karena menunjukkan seberapa besar perubahan bentuk yang terjadi akibat beban hidrodinamika yang bekerja pada bilah turbin. Pada penelitian ini, deformasi diperoleh melalui pendekatan *One-Way Fluid-Structure Interaction (FSI)*, di mana distribusi tekanan dari hasil simulasi CFD diterapkan sebagai beban pada analisis struktur. Gambar 4 menunjukkan distribusi kontur total deformasi.

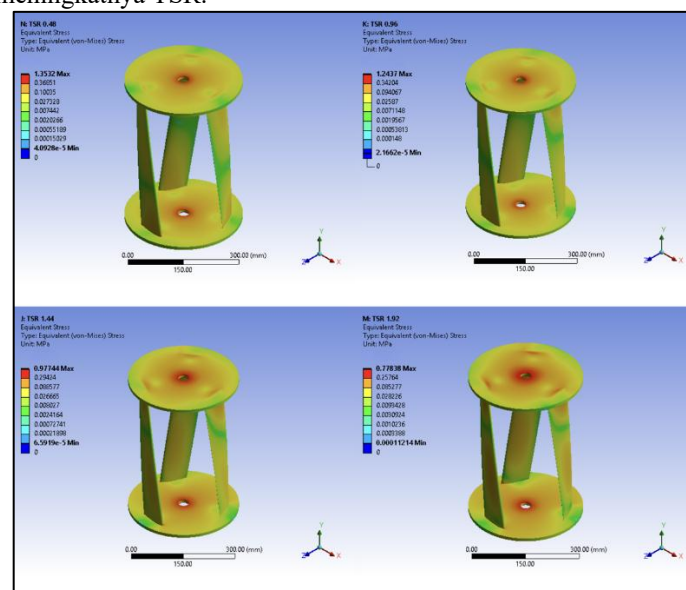


Gambar 4. Kontur Distribusi Deformasi

Berdasarkan distribusi kontur tersebut, terlihat bahwa nilai deformasi maksimum cenderung meningkat seiring dengan peningkatan TSR. Fenomena ini disebabkan oleh meningkatnya kecepatan rotasi turbin seiring dengan kenaikan TSR, yang mengakibatkan gaya hidrodinamika yang bekerja pada bilah menjadi lebih besar. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa peningkatan TSR berbanding lurus dengan peningkatan deformasi struktur. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun performa turbin dapat meningkat pada TSR tinggi, aspek kekuatan struktur tetap perlu diperhatikan untuk menghindari deformasi berlebih.

3.2 Stress Maximum

Analisis tegangan maksimum (*maximum stress*) dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan struktur bilah turbin terhadap beban yang diterima. Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa nilai tegangan maksimum justru mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya TSR.

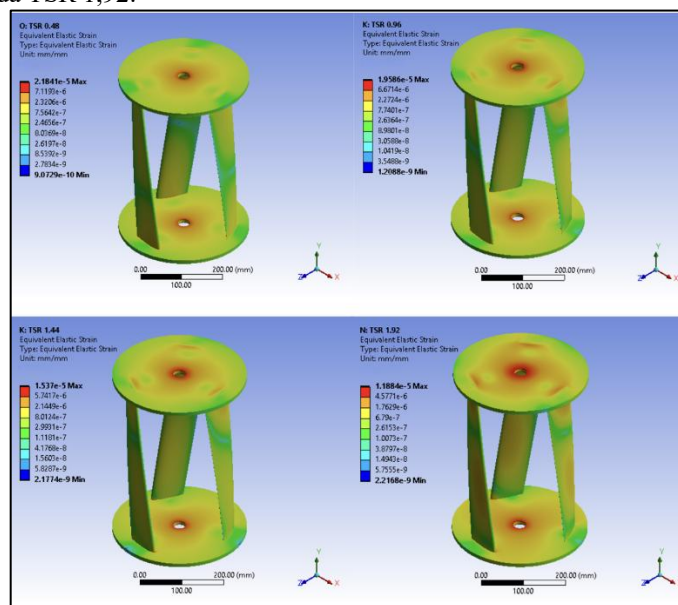


Gambar 5. Kontur Distribusi Stress

Penurunan tegangan ini dapat dijelaskan melalui perubahan distribusi beban pada bilah turbin. Pada TSR rendah, sudut serang (*angle of attack*) cenderung lebih besar, sehingga menghasilkan gaya tekanan yang tinggi dan terfokus pada area tertentu. Hal ini menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan yang tinggi. Sebaliknya, pada TSR yang lebih tinggi, aliran fluida cenderung lebih mengikuti bentuk bilah (*attached flow*), sehingga distribusi tekanan menjadi lebih merata dan mengurangi konsentrasi tegangan. Selain itu, efek rotasi yang lebih tinggi juga membantu mendistribusikan beban secara lebih homogen sepanjang bilah, sehingga tegangan maksimum yang terjadi menjadi lebih kecil meskipun deformasi meningkat. Fenomena ini umum terjadi pada sistem FSI, di mana peningkatan deformasi tidak selalu diikuti oleh peningkatan tegangan maksimum. Hasil ini menunjukkan bahwa dari sisi kekuatan material, kondisi pada TSR tinggi relatif lebih aman karena tegangan maksimum yang terjadi masih lebih rendah dibandingkan kondisi TSR rendah.

3.3 Maximum Strain

Regangan maksimum (*maximum strain*) menggambarkan tingkat deformasi relatif yang terjadi pada material akibat tegangan yang bekerja. Parameter ini penting untuk mengetahui perilaku elastis material serta potensi terjadinya deformasi permanen. Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa nilai regangan maksimum mengalami tren penurunan seiring dengan meningkatnya TSR. Nilai regangan tertinggi terjadi pada TSR 0,48, kemudian menurun secara bertahap hingga mencapai nilai terendah pada TSR 1,92.



Gambar 6. Kontur Distribusi Strain

Penurunan regangan ini sejalan dengan penurunan tegangan maksimum yang terjadi pada bilah turbin. Hal ini sesuai dengan hubungan antara tegangan dan regangan dalam hukum elastisitas, di mana regangan berbanding lurus dengan tegangan selama material masih berada dalam daerah elastis. Dengan berkurangnya tegangan akibat distribusi beban yang lebih merata pada TSR tinggi, maka regangan yang dihasilkan juga menjadi lebih kecil. Meskipun demikian, perlu diperhatikan bahwa deformasi total tetap meningkat pada TSR tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa struktur mengalami perpindahan yang lebih besar, tetapi dengan distribusi tegangan yang lebih merata, sehingga tidak menyebabkan regangan lokal yang tinggi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis *One-Way Fluid-Structure Interaction (FSI)* pada turbin Gorlov, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai deformasi maksimum pada bilah turbin meningkat seiring dengan bertambahnya Tip Speed Ratio (TSR). Hal ini disebabkan oleh peningkatan gaya hidrodinamika akibat kecepatan rotasi yang lebih tinggi, yang menghasilkan beban lentur lebih besar pada struktur.
2. Tegangan maksimum (*Von-Mises stress*) menunjukkan tren penurunan dengan meningkatnya TSR. Kondisi ini terjadi karena distribusi tekanan pada bilah menjadi lebih merata pada TSR tinggi, sehingga mengurangi konsentrasi tegangan pada titik tertentu.
3. Regangan maksimum juga mengalami penurunan seiring dengan peningkatan TSR, yang sejalan dengan penurunan tegangan maksimum dan menunjukkan bahwa material masih bekerja dalam batas elastis.
4. Secara keseluruhan, meskipun deformasi meningkat pada TSR tinggi, nilai tegangan maksimum masih berada di bawah batas kekuatan material, sehingga struktur turbin dapat dinyatakan aman untuk kondisi operasional yang dianalisis.

5. Daftar Pustaka

- [1] Energy Institute, “Statistical Review of World Energy 2024.” [Daring]. Tersedia: <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- [2] M. Erdem, “An evaluation of incentive policy effects on solar power plant cost analysis : a comparative case study approach,” *Energy*, vol. 330, no. July 2024, p. 136901, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.136901.
- [3] I. Hardi, R. Kurniawan, S. Ray, G. Mutig, T. Rizky, and M. S. Abd, “Human Settlements and Sustainability Reducing the poverty gap and severity in Indonesia : The role of renewable energy access and consumption ☆,” *Hum. Settlements Sustain.*, vol. 1, no. 3, pp. 145–157, 2025, doi: 10.1016/j.hssust.2025.06.001.
- [4] Y. N. Ihsan, A. Tussadiah, N. Pridina, and R. M. Utamy, “Renewable Energy from Ocean Currents on the Outflow ITF Pathway , Indonesia,” *Energy Procedia*, vol. 65, pp. 131–139, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.01.045.
- [5] G. Li and W. Zhu, “Tidal current energy harvesting technologies : A review of current status and life cycle assessment,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 179, no. October 2022, p. 113269, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113269.
- [6] S. Sanaye and A. Farvizi, “Optimizing a vertical axis wind turbine with helical blades : Application of 3D CFD and Taguchi method,” *Energy Reports*, vol. 12, no. May, pp. 2527–2547, 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.08.059.
- [7] M. Akhlagi, F. Ghafoorian, M. Mehrpooya, and M. Sharifi Rizi, “Effective Parameters Optimization of a Small Scale Gorlov Wind Turbine, Using CFD Method,” *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, vol. 42, no. 7, pp. 2286–2304, 2023, doi: 10.30492/ijcce.2022.561960.5584.
- [8] R. Kumar and S. Sarkar, “Effect of design parameters on the performance of helical Darrieus hydrokinetic turbines,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 162, no. April, p. 112431, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112431.
- [9] J. M. Tamayo-Avenidaño, I. D. Patiño-Arcila, C. Nieto-Londoño, and J. Sierra-Pérez, “Fluid–Structure Interaction Analysis of a Wind Turbine Blade with Passive Control by Bend–Twist Coupling,” *Energies*, vol. 16, no. 18, p. 6619, Sep. 2023, doi: 10.3390/en16186619.
- [10] G. Li, G. Wu, L. Tan, H. Fan, and Q. Kong, “Optimal design of low-speed current energy turbine based on turbine blades with different pitch angles,” vol. 314, no. June, 2024.
- [11] P. Marsh, D. Ranmuthugala, I. Penesis, and G. Thomas, “Numerical investigation of the influence of blade helicity on the performance characteristics of vertical axis tidal turbines,” *Renew. Energy*, vol. 81, pp. 926–935, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.03.083.