

## STUDI NUMERIK PENGARUH *U-GROOVE* TERHADAP KONTUR *TURBULENCE KINETIC ENERGY* DAN PENINGKATAN TORSI TURBIN GORLOV PADA ARUS LAUT

\*Marsellinus Jonathan Siagian<sup>1</sup>, Syaiful<sup>2</sup>, Shofwan Bahar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

\*E-mail: marselljon@gmail.com

### Abstrak

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki potensi energi arus laut yang sangat besar untuk dikembangkan menjadi sumber energi listrik ramah lingkungan. Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL) merupakan teknologi yang digunakan untuk mengkonversi energi kinetik arus laut menjadi energi listrik, dengan turbin sebagai komponen utamanya. Turbin Gorlov merupakan salah satu jenis turbin sumbu vertikal (VAWT) yang banyak diterapkan dalam sistem konversi energi hidrokinetik sebagai pengembangan dari turbin Darrieus konvensional. Turbin dengan bilah berbentuk heliks ini memiliki keunggulan berupa kemampuan *self-starting* serta stabilitas rotasi yang baik, namun kurang efektif digunakan pada kecepatan aliran rendah. Studi ini bertujuan mengoptimalkan performa turbin Gorlov pada kondisi arus laut kecepatan rendah melalui modifikasi bilah dengan penambahan *U-groove*. Modifikasi bilah kemudian dibandingkan dengan turbin Gorlov tanpa *groove* dan dievaluasi melalui simulasi CFD dengan  $k-\omega$  SST sebagai model turbulensi yang digunakan pada solver ANSYS Fluent 2022. Hasil simulasi menunjukkan adanya fenomena *dynamic stall* pada aliran di sekitar turbin Gorlov saat beroperasi pada TSR rendah. Fenomena ini kemudian mereda secara bertahap seiring meningkatnya kecepatan rotasi turbin. Penambahan *U-groove* pada permukaan bilah menurunkan intensitas Energi Kinetik Turbulen (TKE) pada aliran, sehingga berdampak terhadap peningkatan performa turbin. Peningkatan performa ditandai dengan torsi maksimum turbin dengan *U-groove* yang unggul sebesar 4,18% dibandingkan turbin tanpa *groove*.

**Kata Kunci:** energi kinetik turbulen; kontrol aliran pasif; simulasi cfd; turbin heliks gorlov; *u-groove*

### Abstract

Indonesia, as an archipelagic country, has enormous potential for ocean current energy that can be developed into an environmentally friendly source of electricity. Ocean current power plants are a technology used to convert the kinetic energy of ocean currents into electrical energy, with turbines as their main component. The Gorlov turbine is a type of vertical axis turbine (VAWT) that is widely used in hydrokinetic energy conversion systems as an advancement of the conventional Darrieus turbine. This helical blades turbine is self-starting and rotationally stable, but less effective at low flow speeds. This study intends to improve the Gorlov turbine's performance at low ocean current speeds by adding *U-grooves* to the blades. The improved blades were compared to Gorlov turbines without grooves and evaluated by numerical simulation using  $k-\omega$  SST turbulence model in the ANSYS Fluent 2022 solver. The simulation results demonstrate that dynamic stall occurs at low TSRs. Improved hydrodynamic performance comes from a decrease in the intensity of Turbulence Kinetic Energy (TKE). The 4.18% increase in the *U-groove* turbine's maximum torque over the baseline is used as an indicator of this improvement.

**Keywords:** cfd simulation; gorlov helical turbine; passive flow control; turbulence kinetic energy; *u-groove*

### 1. Pendahuluan

Permintaan masyarakat akan energi listrik meningkat secara cepat seiring dengan berkembangnya zaman. Energi listrik kini bahkan berperan sebagai motor penggerak utama hampir seluruh aktivitas masyarakat. Data dari Global Energy Review 2025 menyebutkan bahwa konsumsi listrik masyarakat global pada tahun 2024 meningkat lebih dari dua kali lipat rata-rata kenaikan tahunan selama satu dekade terakhir (sekitar 1100 TWh), yang didorong oleh berbagai faktor seperti meningkatnya kebutuhan perangkat pendingin akibat suhu ekstrem, bertambahnya konsumsi listrik di sektor industri, elektrifikasi transportasi, serta ekspansi sektor pusat data. Pada tahun yang sama, sekitar 80% pertumbuhan pembangkitan listrik global dipenuhi oleh sumber energi terbarukan dan pembangkit tenaga nuklir [1], [2].

Lautan menyimpan potensi energi terbarukan yang besar, mulai dari energi gelombang laut, arus laut, hingga energi thermal, yang sesuai untuk dikembangkan di kawasan kepulauan Asia Tenggara seperti Indonesia [3], [4]. Meskipun belum memiliki pembangkit tenaga arus laut yang beroperasi secara komersial, Indonesia memiliki potensi energi arus

laut teoritis mencapai 63 GW pada tahun 2023 [5]. Karakteristik arus di perairan Indonesia sangat bervariasi, mulai dari wilayah berkecepatan tinggi seperti di Selat Lantuka, Nusa Tenggara Timur (4,5–5,0 m/s) [6], hingga wilayah dengan arus kecepatan rendah hingga menengah seperti di Selat Toyapakeh, Bali (0,5–3,2 m/s) [7]. Untuk memanfaatkan variasi kondisi aliran tersebut, khususnya pada arus kecepatan rendah, turbin sumbu vertikal (VAWT) menjadi pilihan yang sesuai karena memiliki kemampuan *self-starting* yang lebih baik serta dapat menangkap energi dari segala arah aliran [8–10].

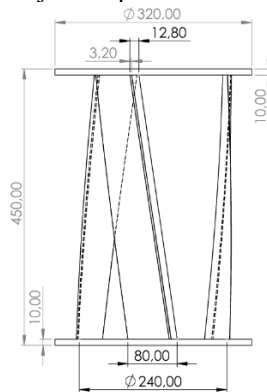
*Vertical Axis Water Turbine* dibagi menjadi dua jenis berdasarkan prinsip kerjanya, yaitu tipe *drag* (seperti turbin Savonius) dan tipe *lift* (seperti turbin Darrieus dan Gorlov) [11], [12]. Penelitian ini berfokus pada turbin Gorlov, yaitu turbin dengan bilah berbentuk heliks yang pertama kali dikembangkan oleh Alexander Gorlov pada tahun 1990-an [13]. Turbin Gorlov merupakan hasil pengembangan dari turbin Darrieus tipe bilah-H dengan keunggulan utama pada desain heliks yang memastikan setiap sudut azimuth memiliki permukaan dengan sudut serang berbeda, sehingga diperoleh efisiensi yang lebih tinggi [14], [15].

Dalam upaya memaksimalkan pemanfaatan energi arus laut, diperlukan berbagai metode optimasi lebih lanjut untuk meningkatkan performa turbin. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah penerapan *drag reduction*, yang terbagi menjadi metode aktif dan pasif [16]. Beberapa metode *passive drag reduction* yang banyak diaplikasikan pada airfoil maupun turbin meliputi *vortex generator*, *dimple*, dan *groove* [17]. Konsep penerapan *groove* terinspirasi dari *dimple* pada bola golf yang terbukti meningkatkan karakteristik aerodinamis melalui modifikasi aliran di sekitar permukaan bola [18], [19]. Pada airfoil, *groove* berfungsi untuk mengubah karakteristik aliran dekat bilah agar *Laminar Separation Bubble*, area di mana aliran laminar terpisah dari permukaan dan membentuk gelembung sebelum berganti menjadi aliran turbulen, dapat dikurangi atau bahkan dicegah [20], [21]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan *groove* berbentuk ‘U’ pada bilah turbin Gorlov terhadap peningkatan performa turbin yang ditinjau melalui visualisasi kontur *Turbulence Kinetic Energy* (TKE) dan peningkatan torsi turbin.

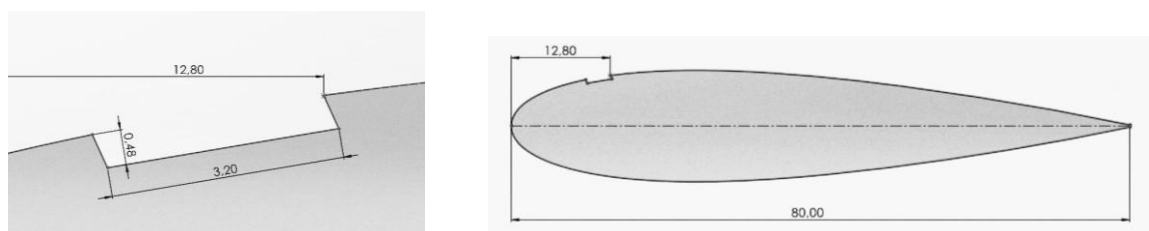
## 2. Metodologi Penelitian

### 2.1 Geometri dan Domain Komputasi

Studi ini menggunakan geometri turbin dan domain simulasi berdasarkan penelitian Li dkk. [22], sedangkan detail dimensi *U-groove* mengacu pada studi Liu dkk. [23]. Geometri turbin Gorlov dirancang menggunakan *software* Solidworks 2023 dengan mempertimbangkan parameter penting seperti dimensi plat, konfigurasi bilah, sudut heliks, jumlah bilah, jenis hidrofoil, dan geometri *groove*. Turbin menggunakan konfigurasi tiga bilah berbentuk heliks dengan sudut kemiringan 30°. Profil hidrofoil yang digunakan adalah NACA 0018 dengan panjang *chord* 80 mm. Dimensi diameter dan tinggi turbin masing-masing sebesar 240 mm dan 450 mm. Pada bagian atas dan bawah turbin terdapat plat penutup berbentuk lingkaran dengan diameter sebesar 320 mm dan tebal 10 mm untuk meningkatkan koefisien daya turbin [24]. Simulasi dilakukan dengan variasi pengujian berupa penambahan *U-groove* pada permukaan bilah turbin. Geometri turbin dan detail desain *U-groove* ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.

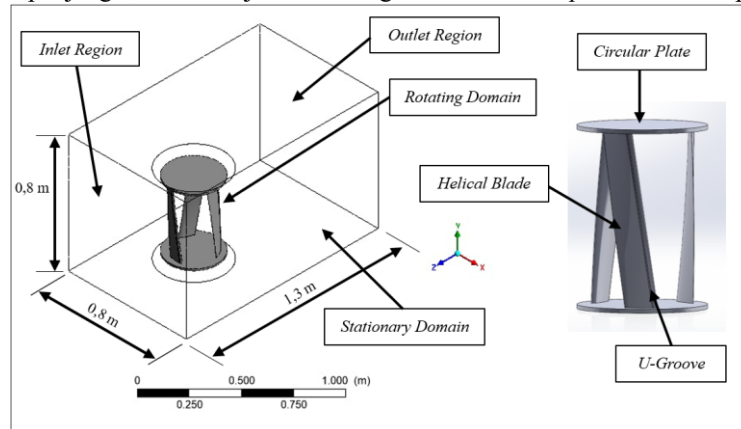


Gambar 1. Dimensi Geometri Turbin Gorlov



Gambar 2. Dimensi Geometri U-Groove

Domain komputasi untuk aliran fluida di sekitar turbin Gorlov dibagi menjadi tiga bagian, yaitu *stationary*, *rotating*, dan *body of influence* (BOI). Domain *stationary* memiliki dimensi  $1,3 \text{ m} \times 0,8 \text{ m} \times 0,8 \text{ m}$  dengan kondisi batas *no-slip* pada semua dinding kecuali sisi depan dan belakang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Turbin diposisikan di dalam domain *rotating* berbentuk tabung yang berjarak  $0,45 \text{ m}$  dari *inlet*. Metode *sliding mesh* diterapkan pada domain *rotating* untuk mensimulasikan gerakan rotasi turbin sehingga diperoleh data torsi dan karakteristik aliran. *Body of influence* dengan diameter  $0,23 \text{ m}$  diposisikan mengelilingi turbin guna menangkap detail aliran fluida pada area dekat bilah. Aliran air dengan densitas  $998,2 \text{ kg/m}^3$  memasuki domain melalui *inlet* dengan kecepatan  $0,5 \text{ m/s}$  dan intensitas turbulensi  $1\%$ , sesuai kondisi arus Samudra Pasifik pada kedalaman  $200\text{-}300 \text{ meter}$  [25]. Setelah melewati domain *rotating*, aliran mengalir sepanjang  $1,3 \text{ m}$  menuju *outlet* dengan kondisi batas *pressure outlet* pada tekanan atmosfer.



Gambar 3. Domain Komputasi

## 2.2 Definisi Parameter

Evaluasi performa hidrokinetik turbin Gorlov dalam studi ini menggunakan beberapa parameter seperti daya, torsi, *Tip Speed Ratio* (TSR), koefisien daya, dan koefisien torsi. Daya turbin ( $P_{\text{turbin}}$ ) ditentukan dari hubungan antara kecepatan rotasi ( $\omega$ ) dan momen torsi ( $T$ ) yang diproduksi melalui perhitungan dengan menggunakan Persamaan (1).

$$P_{\text{turbin}} = \omega \cdot T \quad (1)$$

Nilai kecepatan rotasi turbin dapat dihitung dengan menggunakan rumus perhitungan *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) yang ditunjukkan pada Persamaan (2). Nilai TSR merupakan perbandingan antara kecepatan tangensial ujung bilah terhadap kecepatan aliran bebas [26].

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

Di mana  $D$  didefinisikan sebagai diameter turbin dan  $V$  adalah kecepatan aliran fluida yang mengenai permukaan turbin. Perhitungan torsi turbin dapat dilakukan dengan melibatkan variabel gaya tangensial ( $F$ ) dan jari-jari turbin ( $r$ ) seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (3) sebagai berikut.

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

Pada studi ini, nilai torsi turbin Gorlov diperoleh dari hasil simulasi numerik. Nilai torsi tersebut kemudian digunakan untuk menghitung koefisien daya dan koefisien torsi yang masing-masing ditunjukkan pada Persamaan (4) dan Persamaan (5). Koefisien daya ( $C_p$ ) dihitung sebagai rasio antara daya mekanis turbin dan laju energi kinetik aliran [27].

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

Di mana  $\rho$  merupakan massa jenis air yang mengenai permukaan bilah dan  $A$  merupakan luas area sapuan turbin. Koefisien torsi ( $C_\tau$ ) menunjukkan rasio antara torsi turbin dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh aliran fluida.

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

Energi Kinetik Turbulen (TKE), yang perhitungannya dinyatakan pada Persamaan (6), merupakan parameter yang mengukur besaran tegangan Reynolds, sehingga dapat digunakan untuk menentukan nilai kuantitatif tingkat turbulensi aliran [28].

$$TKE = \frac{1}{2} (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \quad (6)$$

Di mana  $\sigma_u^2$ ,  $\sigma_v^2$ , dan  $\sigma_w^2$  masing-masing menunjukkan fluktuasi kecepatan lintang (u), memanjang (v), dan vertikal (w).

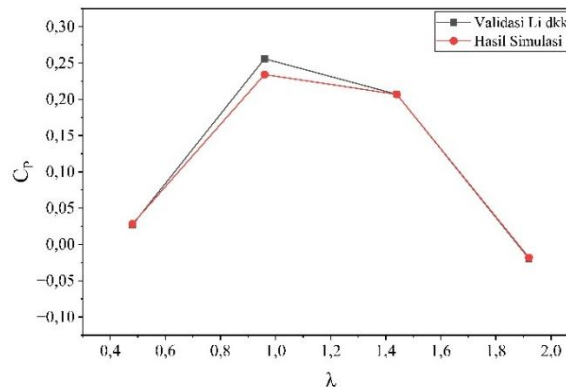
## 2.3 Simulasi Numerik

Performa turbin heliks Gorlov dianalisis lebih lanjut melalui simulasi numerik CFD menggunakan *software* ANSYS Fluent 2022. Persamaan *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS) dengan model turbulensi  $k-\omega$  SST diterapkan untuk

menyelesaikan aliran turbulen yang bersifat *unsteady*, *incompressible*, dan viskos. Algoritma SIMPLE dengan diskritisasi *second order* digunakan untuk memecahkan persamaan korelasi kecepatan dan tekanan. Kriteria konvergensi untuk persamaan kontinuitas, momentum, dan turbulensi ditetapkan pada nilai residual  $10^{-5}$ .

## 2.4 Validasi

Validasi merupakan tahapan pada penelitian yang bertujuan untuk memastikan hasil simulasi mencapai tingkat akurasi dan keandalan yang diharapkan. Prosedur validasi mengacu pada studi turbin heliks yang dilakukan oleh Li dkk. [22]. Validasi menggunakan model turbin heliks tanpa *U-groove* dengan TSR ( $\lambda$ ) sebagai variasi pengujian, sesuai dengan konfigurasi penelitian terdahulu. Hasil validasi pada simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 4. Setelah dilakukan plot grafik validasi serta perhitungan, diperoleh rata-rata persentase *error* antara hasil simulasi dengan literatur sebesar 5,21% sehingga validasi pada studi ini sudah memenuhi syarat  $<10\%$ .

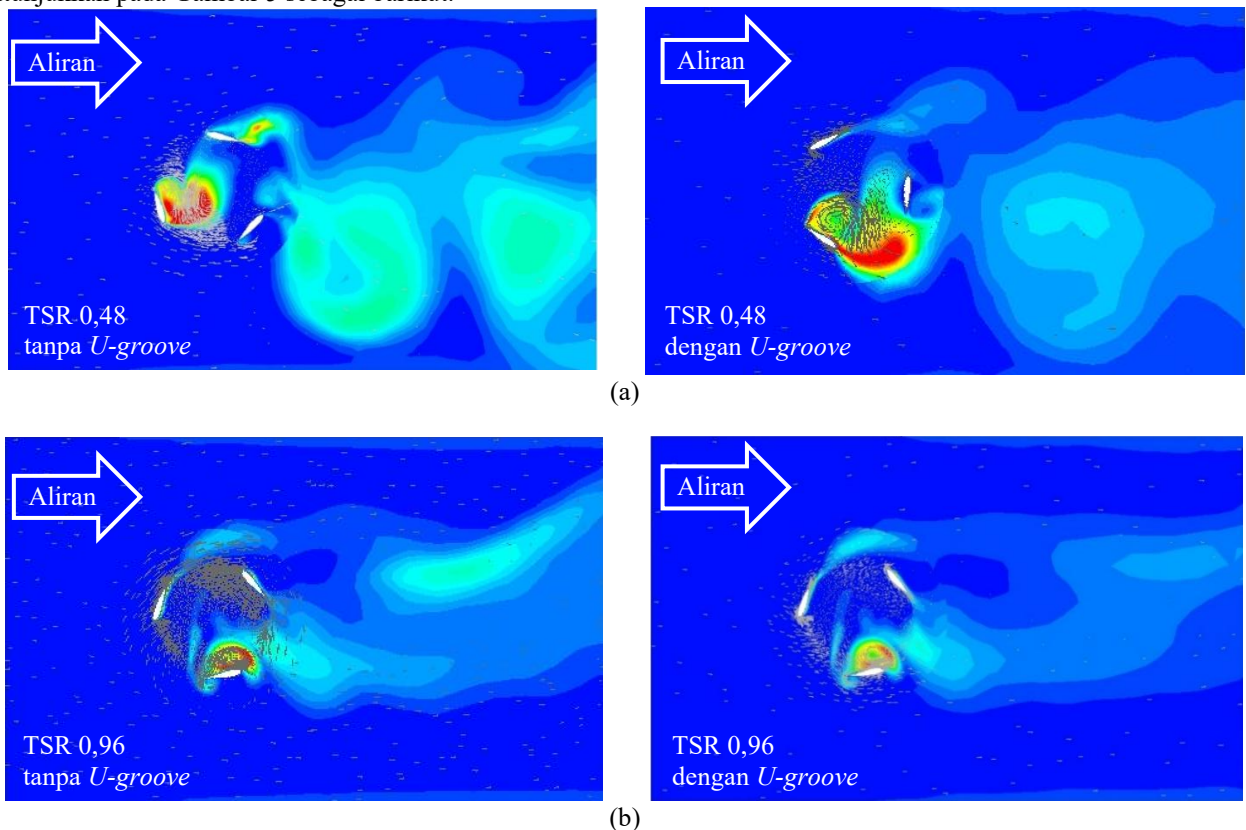


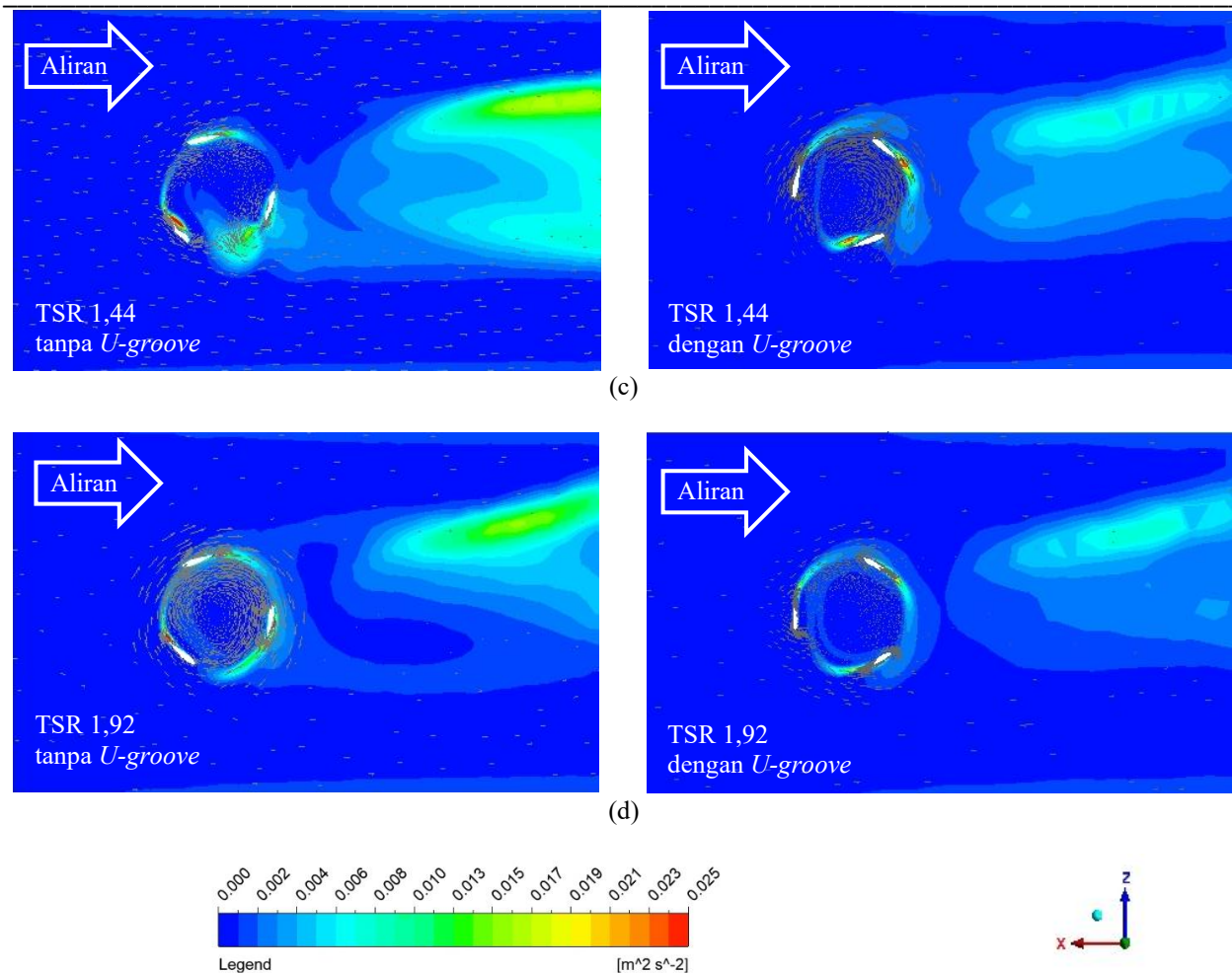
Gambar 4. Validasi

## 3. Hasil Dan Pembahasan

### 3.1 Analisis Kontur Energi Kinetik Turbulen

Karakteristik aliran pada turbin Gorlov dianalisis lebih lanjut melalui kontur *Turbulence Kinetic Energy*. Analisis kontur TKE dilakukan untuk mengidentifikasi pola penyebaran jejak aliran (*wake*) serta distribusi turbulensi pada aliran di sekitar turbin Gorlov. Perbandingan kontur TKE pada turbin Gorlov tanpa dan dengan *U-groove* di setiap variasi TSR ditunjukkan pada Gambar 5 sebagai berikut.





**Gambar 5.** Kontur *Turbulence Kinetic Energy* (TKE) dengan variasi TSR: (a) 0,48; (b) 0,96; (c) 1,44; (d) 1,92

Visualisasi kontur TKE menunjukkan perubahan karakteristik aliran seiring dengan peningkatan kecepatan putar turbin. Perlu dicatat bahwa nilai TKE yang tinggi menandakan fluktuasi energi yang besar, sehingga berpotensi menyebabkan kerugian energi pada turbin. Pada TSR rendah ( $\lambda = 0,48$ ), area berwarna kuning hingga merah yang tersebar di sekitar bilah menunjukkan terjadinya separasi aliran yang masif akibat sudut serang efektif yang tinggi. Kondisi ini menunjukkan fenomena *dynamic stall* yang merupakan efek yang umum terjadi pada turbin vertikal saat beroperasi pada TSR rendah, di mana hidrofoil dalam aliran tak tunak melampaui sudut *stall* statisnya [29]. Penurunan gaya angkat akibat fenomena ini menghasilkan jejak aliran (*wake*) dengan turbulensi tinggi yang sangat lebar di belakang turbin.

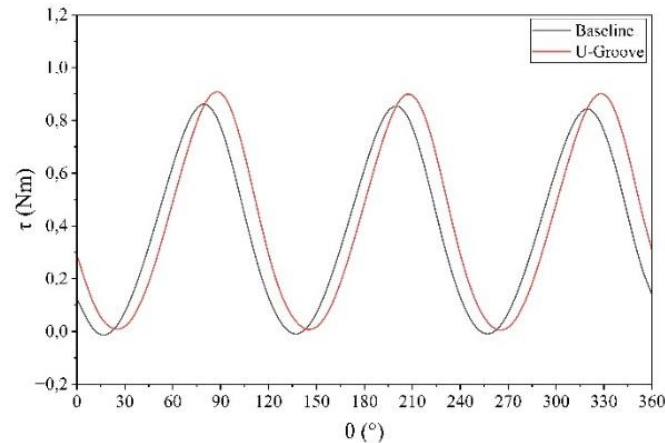
Ketika TSR meningkat ke kondisi optimal ( $\lambda = 0,96$ ), fenomena *dynamic stall* masih terjadi pada bilah di fase *downstream*, namun dengan intensitas dan luasan yang lebih rendah. Pola aliran mengalami perubahan pada TSR yang lebih tinggi, yakni pada  $\lambda = 1,44$  dan  $\lambda = 1,92$ , di mana konsentrasi intensitas TKE bergeser dari permukaan bilah menuju daerah *wake* di belakang turbin mengarah ke sisi *outlet* domain. Pada kondisi ini, struktur aliran menjadi lebih ramping seiring dengan meningkatnya kecepatan rotasi, yang mengindikasikan bahwa aliran air dapat melewati turbin dengan gangguan yang lebih minim dan lebih terarah dibandingkan pada putaran rendah.

Perbandingan kedua model turbin secara keseluruhan menunjukkan bahwa penggunaan U-groove berpengaruh positif terhadap pengendalian aliran. Pada turbin tanpa *groove* (*baseline*), separasi aliran cenderung terjadi lebih awal, menghasilkan turbulensi yang besar dengan area TKE yang melebar di belakang turbin. Sebaliknya, geometri U-groove dapat menciptakan mekanisme *trapped vortex* di dalam celah *groove* yang berfungsi sebagai bantalan fluida [30]. Mekanisme ini membantu menjaga aliran utama tetap menempel lebih lama pada permukaan bilah serta menunda terjadinya separasi. Hasilnya, jejak turbulensi yang ditinggalkan oleh turbin U-groove lebih ramping dengan intensitas energi kinetik yang lebih rendah. Pengurangan area TKE ini berkaitan terhadap penurunan gaya hambat dan peningkatan performa torsi turbin.

### 3.2 Hubungan Torsi terhadap Sudut Azimuth

Analisis torsi terhadap sudut azimuth dilakukan untuk mengevaluasi fluktuasi torsi dan performa turbin pada berbagai posisi bilah terhadap arah aliran. Melalui analisis ini, karakteristik hidrodinamika turbin selama satu siklus

putaran dapat diidentifikasi. Gambar 6 menunjukkan grafik hubungan torsi terhadap sudut azimuth turbin Gorlov desain *baseline* dan dengan *U-groove*.



**Gambar 6.** Grafik Hubungan Torsi terhadap Sudut Azimuth

Berdasarkan Gambar 6, nilai torsi maksimum turbin Gorlov tanpa *groove* diperoleh pada  $\theta = 80,21^\circ$ , yakni sebesar 0,862 Nm. Sedangkan pada turbin dengan *U-groove*, nilai maksimum lebih unggul 4,18% dibandingkan desain *baseline*, yakni sebesar 0,898 Nm yang diperoleh pada  $\theta = 206,26^\circ$ . Peningkatan tersebut mengindikasikan bahwa *U-groove* meningkatkan *lift* sekaligus mereduksi *drag* secara lebih efektif dibandingkan bilah polos. Adapun nilai torsi terendah yang diperoleh turbin Gorlov dengan dan tanpa *U-groove* berturut-turut sebesar 0,007 Nm (pada  $\theta = 263,56^\circ$ ) dan -0,009 Nm (pada  $\theta = 137,51^\circ$ ). Nilai positif torsi turbin Gorlov dengan *U-groove* di seluruh sudut azimuth menunjukkan bahwa turbin Gorlov yang dimodifikasi dengan penambahan *U-groove* memiliki kemampuan *self-starting* yang lebih baik terlebih untuk aliran dengan arus rendah. *Self-starting* merupakan kemampuan turbin untuk berotasi dari keadaan diam hingga mencapai titik di mana turbin mulai menghasilkan *output* yang berguna tanpa perlu adanya tambahan gaya eksternal [31].

#### 4. Kesimpulan

Studi ini membandingkan karakteristik hidrodinamika turbin heliks Gorlov dengan dan tanpa *U-groove*. Berdasarkan hasil simulasi numerik serta analisis yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Terjadi fenomena *dynamic stall* ketika turbin Gorlov dalam kondisi TSR 0,48 dan TSR 0,96 yang kemudian mereda saat kecepatan turbin meningkat hingga TSR 1,92. Pada kondisi TSR tinggi, kondisi intensitas TKE bergeser dari permukaan bilah menuju area *wake* di belakang turbin.
2. Penambahan *U-groove* mengurangi intensitas TKE berlebih pada aliran di sekitar turbin Gorlov, sehingga berdampak pada penurunan gaya hambat turbin.
3. Turbin yang dilengkapi dengan *U-groove* menghasilkan torsi maksimum yang lebih tinggi 4,18% dibandingkan dengan turbin tanpa *groove*. Hal ini mengindikasikan bahwa *U-groove* bekerja efektif sebagai mekanisme kontrol aliran pasif dengan menunda terjadinya separasi aliran pada permukaan bilah, sehingga menghasilkan peningkatan gaya angkat turbin.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] International Energy Agency, "Global Energy Review 2025." Diakses: 19 Des. 2025. [Daring]. Tersedia di: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>
- [2] E. Graham, F. Nicolas, K. Altieri, "Global Electricity Review 2025," Apr. 2025.
- [3] M. A. J. R. Quirapas, A. Taeihagh, "Ocean renewable energy development in Southeast Asia: Opportunities, risks and unintended consequences," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, p. 110403, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110403.
- [4] M. A. J. R. Quirapas, H. Lin, M. L. S. Abundo, S. Brahim, D. Santos, "Ocean renewable energy in Southeast Asia: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 799–817, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.RSER.2014.08.016.
- [5] Dewan Energi Nasional, "Outlook Energi Indonesia 2023," Jakarta, 2023.
- [6] A. Firdaus, G. Houlisby, T. Adcock, "Tidal Energy Resource in Larantuka Straits, Indonesia," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, vol. 173, pp. 1–38, Jan. 2019, doi: 10.1680/jener.19.00042.
- [7] K. Orhan & R. Mayerle, "Potential hydrodynamic impacts and performances of commercial-scale turbine arrays in the strait of Larantuka, Indonesia," *J Mar Sci Eng*, vol. 8, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/jmse8030223.

- [8] S. Mohammadi, M. Hassanalian, H. Arionfard, S. Bakhtiyarov, "Optimal design of hydrokinetic turbine for low-speed water flow in Golden Gate Strait," *Renew Energy*, vol. 150, pp. 147–155, Mei 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.12.142.
- [9] K. Liu, M. Yu, W. Zhu, "Performance analysis of vertical axis water turbines under single-phase water and two-phase open channel flow conditions," *Ocean Engineering*, vol. 238, p. 109769, Okt. 2021, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2021.109769.
- [10] H. Seifi Davari, M. Seify Davari, E. L. Ntantis, "A review on the design and optimization of lift-based hydrokinetic turbines: Darrieus, Gorlov, and helical types," *Results in Engineering*, vol. 28, p. 107746, Des. 2025, doi: 10.1016/J.RINENG.2025.107746.
- [11] W. H. Chen, J. S. Wang, M. H. Chang, J. K. Mutuku, A. T. Hoang, "Efficiency improvement of a vertical-axis wind turbine using a deflector optimized by Taguchi approach with modified additive method," *Energy Convers Manag*, vol. 245, p. 114609, Okt. 2021, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2021.114609.
- [12] M. M. Aslam Bhutta, N. Hayat, A. U. Farooq, Z. Ali, S. R. Jamil, and Z. Hussain, "Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 1926–1939, Mei 2012, doi: 10.1016/J.RSER.2011.12.004.
- [13] A. Zhang, S. Liu, Y. Ma, C. Hu, Z. Li, "Field tests on model efficiency of twin vertical axis helical hydrokinetic turbines," *Energy*, vol. 247, p. 123376, Mei 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.123376.
- [14] A. Chalaca, L. Velásquez, A. Rubio-Clemente, E. Chica, "Design and Optimization of a Gorlov-Type Hydrokinetic Turbine Array for Energy Generation Using Response Surface Methodology," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 19, 2024, doi: 10.3390/en17194870.
- [15] J. C. Pineda, A. Rubio-Clemente, E. Chica, "Optimization of a Gorlov Helical Turbine for Hydrokinetic Application Using the Response Surface Methodology and Experimental Tests," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 22, 2024, doi: 10.3390/en17225747.
- [16] T. Desai, S. Paul, U. Kalburgi, S. Mandal, "Review of Active and Passive Devices for Drag Reduction," *Acceleron Aerospace Journal*, vol. 4, pp. 1056–1081, Apr. 2025, doi: 10.61359/11.2106-2521.
- [17] T. A. Orvi, I. Hossain, M. Hassan, "Computational and experimental investigation of lower-surface dimple effects on NACA 0015 airfoil aerodynamics," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 72, p. 102228, Des. 2025, doi: 10.1016/J.JESTCH.2025.102228.
- [18] Jooha Kim & Haecheon Choi, "Aerodynamics of a golf ball with grooves," *Proc Inst Mech Eng P J Sport Eng Technol*, vol. 228, no. 4, pp. 233–241, Jul. 2014, doi: 10.1177/1754337114543860.
- [19] T. Ibatan, M. S. Uddin, M. A. K. Chowdhury, "Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders," *Surf Coat Technol*, vol. 272, pp. 102–120, Jun. 2015, doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2015.04.017.
- [20] Y. Liu & Y. Yin, "Numerical investigation of unsteady aerodynamics on a grooved NACA 4415 airfoil," *Renew Energy*, vol. 237, p. 121567, Des. 2024, doi: 10.1016/J.RENENE.2024.121567.
- [21] Y. Liu, P. Li, W. He, K. Jiang, "Numerical study of the effect of surface grooves on the aerodynamic performance of a NACA 4415 airfoil for small wind turbines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 206, p. 104263, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JWEIA.2020.104263.
- [22] G. Li, G. Wu, L. Tan, H. Fan, Q. Kong, "Optimal design of low-speed current energy turbine based on turbine blades with different pitch angles," *Ocean Engineering*, vol. 314, p. 119488, Des. 2024, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2024.119488.
- [23] Y. Liu, P. Li, W. He, K. Jiang, "Numerical study of the effect of surface grooves on the aerodynamic performance of a NACA 4415 airfoil for small wind turbines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 206, p. 104263, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JWEIA.2020.104263.
- [24] P. Marsh, D. Ranmuthugala, I. Penesis, 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, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.RENENE.2015.03.083.
- [25] J.-N. Wang, F. Wang, L.-L. Zhang, "Construction and operation of a deep-sea scientific observation network in the western pacific; [西太平洋深海科学观测网的建设和运行]," *Oceanologia et Limnologia Sinica*, vol. 48, no. 6, pp. 1471 – 1479, 2017, doi: 10.11693/hyhz20170900228.
- [26] Y. Zhang, C. Kang, C. Pan, W. Opare, "Numerical investigation of performance and flow patterns of a modified Savonius hydraulic rotor," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 240, no. 4, p. 42009, Mar. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/240/4/042009.
- [27] S. Pongduang, C. Kayankannavee, Y. Tiaple, "Experimental Investigation of Helical Tidal Turbine Characteristics with Different Twists," *Energy Procedia*, vol. 79, pp. 409–414, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.11.511.
- [28] C. S. Bang, Z. A. Rana, S. A. Prince, "CFD Analysis on Novel Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)," *Machines*, vol. 12, no. 11, 2024, doi: 10.3390/machines12110800.
- [29] C. Simão Ferreira, G. van Kuik, G. van Bussel, F. Scarano, "Visualization by PIV of dynamic stall on a vertical axis wind turbine," *Exp Fluids*, vol. 46, no. 1, pp. 97–108, 2009, doi: 10.1007/s00348-008-0543-z.

- 
- [30] P. Sooraj & A. Agrawal, “Passive flow control mechanism in a bio-inspired corrugated hydrofoil,” *SN Appl Sci*, vol. 1, no. 11, p. 1505, 2019, doi: 10.1007/s42452-019-1562-5.
- [31] D. Satrio & I. K. A. P. Utama, “Experimental investigation into the improvement of self-starting capability of vertical-axis tidal current turbine,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 4587–4594, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.07.027.