

SIMULASI NUMERIK PENGARUH U-GROOVE TERHADAP PERFORMA TURBIN GORLOV UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK ARUS LAUT

*Rizlan Riyadi¹, Syaiful², Joga Dharma Setiawan²

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: rizlanriyadi01@gmail.com

Abstrak

Energi terbarukan dengan memanfaatkan arus laut untuk membangkitkan energi listrik telah menjadi perhatian banyak peneliti. Turbin Gorlov dapat dimanfaatkan untuk mengubah energi kinetic arus laut menjadi menjadi energi listrik. Beberapa parameter turbin Gorlov, seperti sumbu bilah bertikal, sumbu bilah heliks, dan sumbu bilah horizontal menjadi parameter yang perlu diperhatikan. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk memodelkan kinerja Turbin Gorlov dengan membuat groove pada permukaan sudu turbin. Groove dengan bentuk U dengan kedalaman 0,5 cm diberikan pada permukaan sudu turbin. Bilah turbin dirancang dengan bentuk airfoil NACA 4412. Hasil penelitian menunjukkan, adanya peningkatan nilai coefficient power dengan menggunakan variasi groove dibandingkan dengan bilah turbin normal. Hal ini disebabkan oleh perbedaan luas permukaan yang terkena aliran fluida pada permukaan bilah turbin. Coefficient power dengan groove mencapai nilai tertinggi sebesar 0.88. Sedangkan pada bilah turbin normal, coefficient power tertinggi adalah sebear di 0.84.

Kata Kunci : energi terbarukan; groove; koefisien power; turbin gorlov

Abstract

Renewable energy by utilizing ocean currents to generate electrical energy has become the focus of many researchers. Gorlov turbines can be used to convert the kinetic energy of ocean currents into electrical energy. Several parameters of Gorlov turbines, such as the vertical blade axis, helical blade axis, and horizontal blade axis are parameters that need to be considered. Therefore, this study aims to model the performance of the Gorlov Turbine by making grooves on the surface of the turbine blade. A U-shaped groove with a depth of 0.5 cm is given on the surface of the turbine blade. The turbine blades are designed with a NACA 4412 airfoil shape. The results showed an increase in the power coefficient value using groove variations compared to normal turbine blades. This is due to the difference in surface area exposed to fluid flow on the surface of the turbine. The power coefficient with grooves reaches the highest value of 0.88. While in normal wind turbines, the highest power coefficient is 0.84.

Keywords: Failure Mode and Effect Analysis, Fault Tree Analysis, Critical components, MTBF, Reliability, Risk Priority Number, Public Vehicle Charging Station.

Keywords : coefficient power; groove; gorlov turbine; renewable energy

1. Pendahuluan

Semakin berkurangnya sumber energi fosil oleh karena penggunaannya secara terus menerus mendorong para peneliti untuk mengembangkan sumber energi alternatif lainnya, seperti energi matahari, energi angin, energi air, biomassa dan energi panas bumi. Pemanfaatan energi air, salah satu contohnya, dilakukan dengan mengubah kecepatan atau ketinggian aliran untuk menghasilkan listrik [1]. Pembangkit listrik tenaga arus air laut mengubah energi mekanik air menjadi energi listrik. Perkembangan teknologi arus air laut di Indonesia belum begitu diminati. Hal ini dapat dilihat dari sumber energi yang ada masih didominasi oleh pembangkit tenaga air yang memanfaatkan energi potensial. Jika dilihat dari iklim dan letak geografis, Indonesia memiliki luas wilayah daratan seluas 1.905 juta km² dan wilayah perairan seluas 3.257 juta km² [1]. Dari letak geografis ini Indonesia mempunyai potensi besar untuk memanfaatkan teknologi pembangkit tenaga arus air laut.

Teknologi tenaga arus air laut dibagi menjadi dua kategori, yaitu *axial flow* turbin dan *cross flow* turbin. Pada *axial flow* turbin, arah aliran air adalah sejajar dengan poros turbin. Sedangkan pada *cross flow* turbin, arah aliran air adalah sejajar dengan poros turbin. Posisi poros turbin pada *cross flow* dibagi menjadi dua, yaitu *Horizontal Axis Water Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Water Turbine* (VAWT) [3]. Pada HAWT, posisi sumbu putar turbin adalah horizontal dan posisi sumbu turbin adalah vertical pada VAWT. Terdapat dua jenis turbin air pada *cross flow turbine*, yaitu turbin air Darrieus dan turbin air helikal Gorlov. Turbin Darrieus menghasilkan daya yang lebih baik, tetapi menimbulkan vibrasi

pad tip speed ratio yang tinggi. Di sisi lain, turbin Gorlov adalah lebih baik dalam *starting rotation* [4]. Turbin helikal Gorlov merupakan penyempurnaan dari turbin Derrius [5]. Turbin Derrius mempunyai sudu lurus, sedangkan turbin Gorlov mempunyai sudu helikal.

Turbin helikal Gorlov adalah sebuah turbin air yang dirancang oleh Prof. Alexander M. Gorlov dari Northeastern University. Turbin ini merupakan modifikasi dari turbin Derrius dengan menggunakan blade berbentuk helik. Kelemahan dari turbin Darrieus diatasi oleh turbin Gorlov ini. Turbin Derrius memiliki banyak bentuk. Gaya pada bilah turbin Derrieus bervariasi seiring dengan putaran bilah. Hal ini menyebabkan torsi poros akan berfluktuasi dari waktu ke waktu, yang dikenal sebagai “torque ripple”, yang dapat menyebabkan getaran pada poros dan berpotensi merusak turbin [6]. Pada turbin Gorlov, bentuk heliks pada bilah meningkatkan nilai torsi, sehingga meningkatkan koefisien daya pada turbin.

Pembentukan groove dilakukan dengan mengubah permukaan blade turbine menjadi kasar (seperti alur berbagai bentuk) yang bertujuan untuk mengontrol aliran dan gaya yang bekerja pada blade turbin [13]. Dibandingkan dengan menambahkan struktur tambahan pada permukaan silinder, bentuk U-groove memiliki kemampuan yang signifikan. Pertama, bentuk ini tidak secara substansial mengubah bentuk struktur asli. Kedua, groove dapat digunakan bersamaan dengan metode pengurangan gesekan antara fluida dengan blade turbin lainnya [14]. Oleh karena itu, teknik ini dapat digunakan secara omnidiireksional untuk pengontrolan aliran.

Contoh lain peningkatan kinerja aliran pada turbin adalah penggunaan deflector [15]. Penggunaan deflector pada hulu turbin dapat meningkatkan koefisien torsi dan daya dari turbin. Eksperimen dengan terowongan angin menggunakan visualisasi aliran asap untuk menunjukkan pola aliran di sekitar plat deflektor datar dan rotor turbin [16]. Hasilnya menunjukkan bahwa aliran terpisah yang mengelilingi deflektor terserap ke dalam zona tekanan rendah yang terletak di antara deflektor dan bilah. Sebagai akibatnya, tekanan di sekitar bilah deflektor meningkat. Tekanan pada permukaan bilah meningkatkan torsi negatif pada bilah yang mengurangi torsi positif dari model turbin. Zona intensitas turbulensi yang buruk terbentuk di hilir deflektor pelat datar yang memiliki pengaruh cukup besar pada dinamika aliran, terutama di dekat bilah turbin, yang merupakan kelemahan utama dari jenis deflektor ini [17]. Oleh karena itu, deflektor dengan bentuk lain, seperti bentuk lingkaran, adalah lebih baik untuk meminimalkan efek buruk ini. Penelitian dengan menggunakan deflektor dengan bentuk lingkaran dapat meningkatkan kinerja dari turbin [18]. Dari studi ini didapat bahwa struktur vortical dapat diamati di hilir deflektor lingkaran. Pemisahan aliran di atas deflektor menunjukkan pusaran yang besar dan kuat yang menyebabkan ketidakstabilan aliran dan berdampak negatif pada aliran bilah turbin.

Sistem kontrol aliran fluida secara pasif seperti disebutkan di atas salah satunya adalah penggunaan deflector telah banyak dilakukan dibandingkan dengan penggunaan sistem kontrol pasif berupa penambahan bentuk Groove pada turbin. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus kepada dampak dari penambahan bentuk U-Groove pada blade terhadap performa dari turbin.

2. Deskripsi Model

2.1 Model Fisik

Desain fisik turbin Gorlov melibatkan beberapa parameter, seperti radius cakram, geometri sudu, sudut pitch helix, jumlah sudu, pemilihan airfoil dan bentuk groove. Tinggi turbin ditentukan dengan rasio 1 : 1 terhadap diameter turbin, yang mana diameter turbine adalah 0.6 m. Sudu turbin ditentukan helical dengan penambahan U-groove pada permukaan bilah turbin, seperti yang diinformasikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi geometri turbin	
Tinggi Turbin	0.6 m
Diamter Turbin	0.6 m
Profile Sudu	NACA 4412
Jumlah Sudu	3
Chord Length Sudu	0.15 m
Pitch Helix	2.4 m
Helix Angle	60°
Kedalaman Groove	0.05 m



Gambar 1. Model geometri turbin

NACA 4412 digunakan sebagai bentuk airfoil pada sudu turbin. 4 digit kode digunakan untuk menentukan bentuk dari sebuah airfoil. Digit pertama menunjukkan ketinggian maksimum pada chord. Digit kedua menunjukkan lokasi titik ketinggian maksimum sepanjang garis chord dari tepi depan, dan dua digit terakhir menunjukkan ketebalan chord.

2.2 Persamaan-persamaan pembangun

Simulasi numerik dilaksanakan dengan menentukan persamaan yang menggambarkan aliran fluida dalam bentuk persamaan matematika yang terkait dengan hukum fisika dalam studi ini. Dalam simulasi ini, persamaan tersebut mewakili konservasi massa dan momentum. Model $k-\varepsilon$ standar dipilih untuk memvisualisasikan karakteristik aliran turbulen yang melintasi bilah turbin. Model ini memungkinkan untuk memprediksi distribusi kecepatan dan variabel lainnya dalam aliran fluida, dengan memperhitungkan efek turbulensi.

Konservasi massa :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Konservasi momentum :

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \vec{v}) + \vec{F} \quad (2)$$

dimana \vec{F} adalah gaya eksternal yang bekerja.

Model turbulensi $k-\varepsilon$ diaplikasikan pada daerah dengan bilangan Reynolds yang tinggi. Pada daerah sekitar dinding dengan bilangan Reynolds mendekati nol, dibutuhkan persamaan khusus yang dikenal dengan istilah *wall-function*. Model $k-\varepsilon$ terdiri dari energi kinetik turbulen dan laju disipasi energi turbulen yang dinyatakan berturut-turut pada Persamaan (3) dan (4).

Energi kinetik turbulen,

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (3)$$

dimana G_k merepresentasikan pembentukan energi kinetik turbulen yang diakibatkan oleh adanya gradien kecepatan. G_b menyatakan pembentukan energi kinetik turbulen yang diakibatkan oleh daya apung. Sedangkan Y_m adalah fluktuasi turbulen terhadap disipasi.

Laju disipasi,

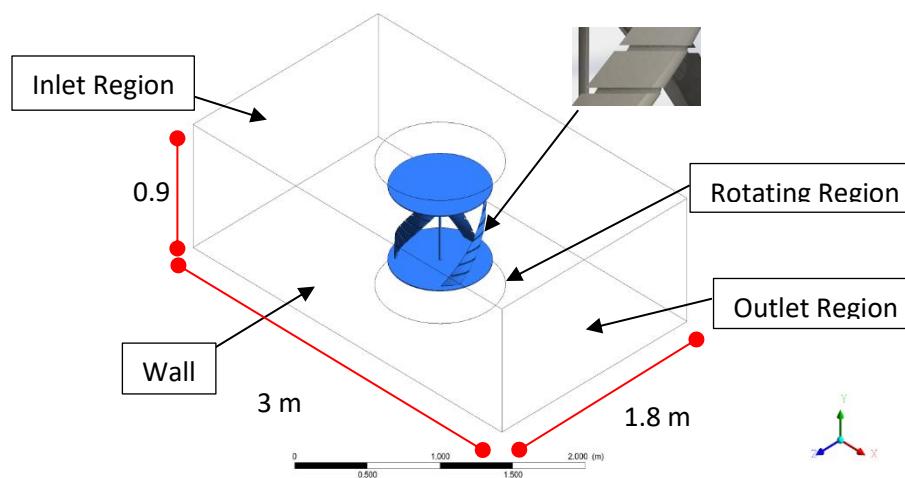
$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

dimana $C_{1\varepsilon}$ $C_{2\varepsilon}$ $C_{3\varepsilon}$ adalah konstanta. σ_k dan σ_ε adalah bilangan Prandtl turbulent berturut-turut untuk k dan ε . Pada model $k-\varepsilon$ standar, $C_{1\varepsilon}$ $C_{2\varepsilon}$ $C_{3\varepsilon}$ ditentukan berturut-turut sebagai berikut $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_{3\varepsilon} = 0.09$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

3. Model Numerik

3.1 Domain Komputasi dan Geometri

Domain komputasi mempunyai panjang, lebar, dan tinggi berturut-turut 3 m, 1,8 m, dan 0,9 m. Jarak antara sudu turbin dengan dinding adalah 1.5D. Arah kecepatan fluida ditentukan searah dengan sumbu-X yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Domain Komputasi

3.2 Kondisi Batas

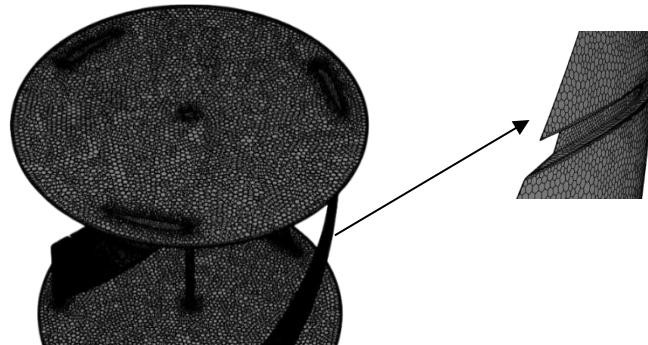
Kondisi batas pada pemodelan ini dibagi menjadi 2 bagian, pada *Inlet* dan *Outlet*. Dalam studi ini, kecepatan seragam air ditentukan 1,5 m/s [22]. Komponen kecepatan pada sumbu lain (relatif terhadap *rotating region*) kecuali pada sumbu-

Z ditetapkan nol. Percepatan gravitasi ditentukan pada arah sumbu-Y. Kondisi batas pada dinding ditentukan adiabatic dan no-slip. Kondisi batas di outlet ditentukan sebagai *pressure outlet*, yaitu pada tekanan atmosfir.

3.3 Metode Numerik

Pada pemodelan ini, mesh dibagi menjadi 3 bagian utama, yaitu outer region, rotating region, dan turbin region. Pada turbin region dan rotating region ditentukan dengan bentuk mesh polyhedral, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Mesh polyhedral dapat mengoptimasi jumlah grid dan cocok digunakan untuk geometri yang kompleks [21].

Pemodelan sekarang ini dilakukan pada kondisi *transient*. Algoritma coupled digunakan untuk memecahkan masalah korelasi kecepatan dan tekanan. Standard k- ϵ digunakan untuk memodelkan aliran turbulen. *Standard wall function* digunakan untuk mentritmen aliran dekat daerah dinding.



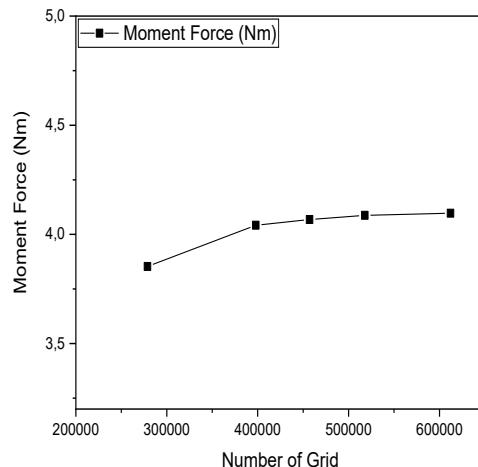
Gambar 3. Detail Mesh Pada Turbin Region

Mesh yang digunakan untuk simulasi sudah melewati tahap grid independent yang ditampilkan pada Gambar 4. Untuk menangani perubahan cepat dalam aliran fluida yang terjadi di sekitar dinding, standard wall treatment digunakan dalam simulasi ini karena model ini memperhitungkan hubungan antara variabel aliran pada jarak tertentu dari dinding dan kondisi aliran di daerah turbulen yang terpisah dari dinding.

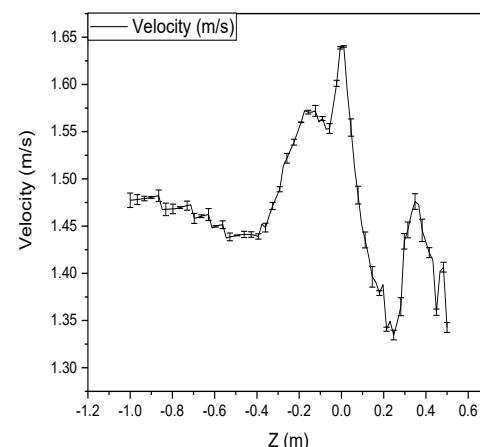
3.4 Grid Independent

Gambar 4. menunjukkan uji *grid independent* pada studi numerik turbin Gorlov ini. Uji grid independent dilakukan untuk menentukan jumlah grid yang minimum dimana penambahan jumlah grid sudah tidak mempengaruhi perubahan nilai dari parameter yang ditentukan. Uji grid ini dilakukan pada domain komputasi turbin Gorlov dengan 5 variasi jumlah grid pada rentang 270.000 hingga 620.000. Pengujian dilakukan dengan mengkalkulasikan nilai momen gaya pada setiap grid.

Metode *grid convergence index* (GCI) digunakan untuk menginvestigasi keakurasi uji grid yang telah dilakukan [22]. GCI diuji pada grid 395.000, 450.000, 612.000, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil uji grid dan GCI menunjukkan 395.000 elemen sebagai grid yang optimal dengan penyimpangan kurang dari 2%.



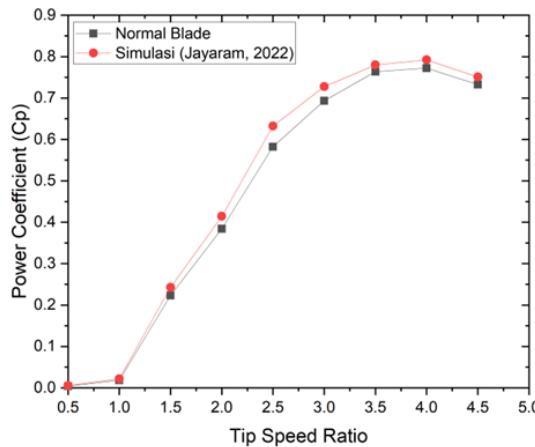
Gambar 4. Grid Independent



Gambar 5. Distribusi kecepatan pada sumbu-z

3.5 Validasi

Untuk mendapatkan hasil simulasi yang baik, simulasi sekarang ini divalidasi dengan simulasi yang telah dilakukan oleh Jayaram dkk.[10] Jayaram dkk. memvariasikan tinggi dari desain turbin Gorlov dalam simulasinya. Dengan menggunakan metode *index revolution*, tinggi turbin ditentukan 0.5 m sampai 0.9 m. Selisih tinggi turbin ditentukan 0.05 m per variasi dengan 9 variasi dari desain turbin Gorlov. Gambar 6 menunjukkan perbandingan hasil simulasi yang dilakukan oleh Jayaram dkk. dan hasil simulasi sekarang ini.

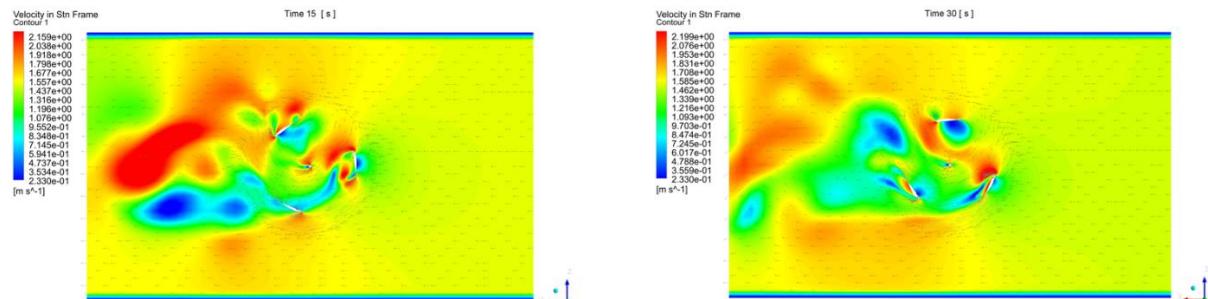


Gambar 6. Validasi hasil simulasi dari pemodelan sekarang ini dan Jayaram (Present Calculation)

4. Hasil dan Pembahasan

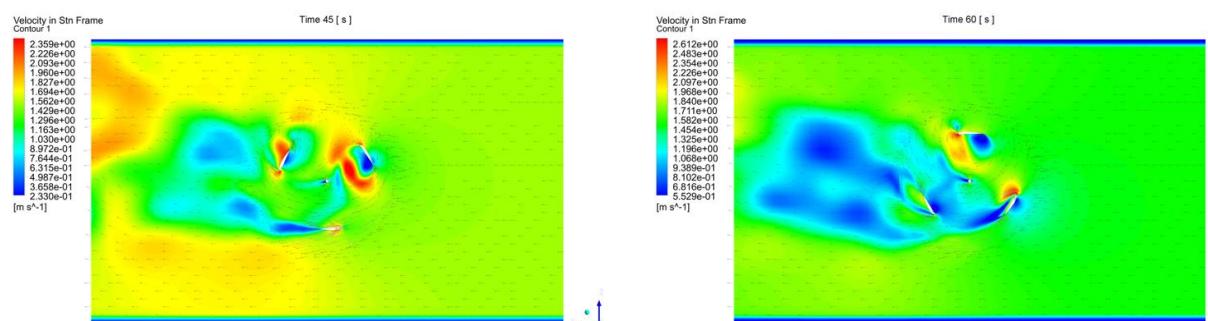
4.1 Medan aliran kecepatan

Medan kecepatan aliran disekitar blade turbin adalah perlu untuk mengetahui gambaran kecepatan mana yang menguntungkan dan merugikan terhadap daya pembangkitan. Nilai kecepatan yang dihasilkan turbin berbeda pada tiap interval. Hal ini menunjukkan aliran kecepatan yang mengenai tiap blade turbin disetiap interval nya. Aliran fluida yang masuk dari bagian inlet terlihat dengan warna yang seragam dan mulai berubah warna ketika memasuki area rotasi turbin. Pada gambar 7, terlihat blade turbin mendapat kecepatan maksimal ketika aliran fluida tegak lurus dengan bagian permukaan turbin, sebaliknya kecepatan pada blade turbin mengalami nilai minimum jika permukaan blade turbin relatif sejajar dengan arah aliran fluida.



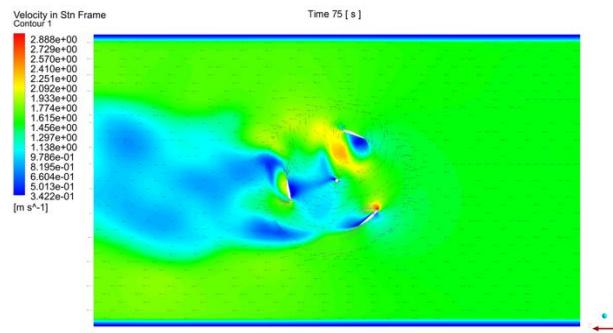
a). Velocity field pada detik ke-15

b). Velocity field pada detik ke-30



c). Velocity field pada detik ke-45

d). Velocity field pada detik ke-60

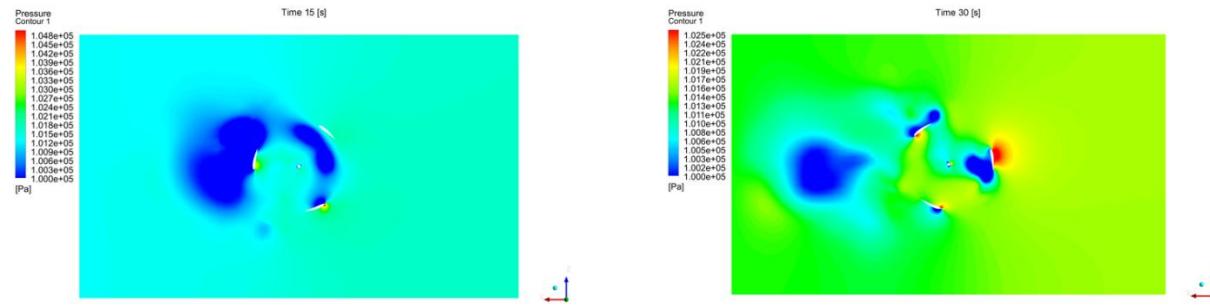


e). Velocity field pada detik ke-75

Gambar 7. Velocity contour pada tiap periode waktu

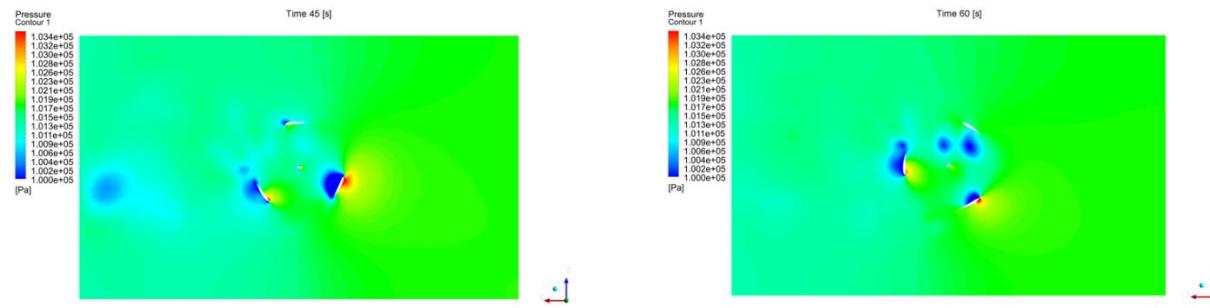
4.2 Distribusi Tekanan

Distribusi tekanan menunjukkan kenaikan tekanan pada permukaan blade yang bersinggungan langsung dengan aliran fluida. Kenaikan tekanan menandakan bahwa energi kinetik fluida meningkat saat mendekati turbin. Hal ini bisa menyebabkan aliran menjadi lebih tidak stabil dan cenderung membentuk pusaran atau vortex. Jika tekanan naik tajam dan kemudian turun seketika, dapat menyebabkan pemisahan aliran dari permukaan turbin. Ketika aliran terpisah, area bertekanan rendah dapat terbentuk, dan ini merupakan kondisi yang ideal untuk pembentukan vortex.



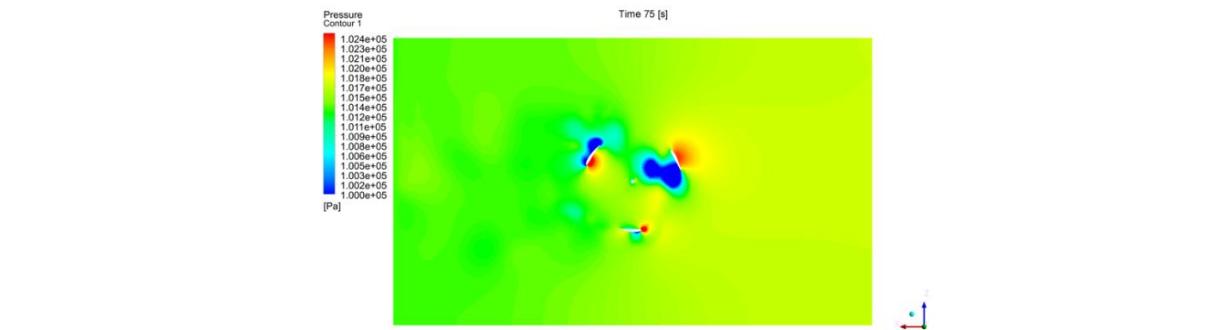
a). Pressure contour pada detik ke-15

b). Pressure contour pada detik ke-30



c). Pressure contour pada detik ke-45

d). Pressure contour pada detik ke-60

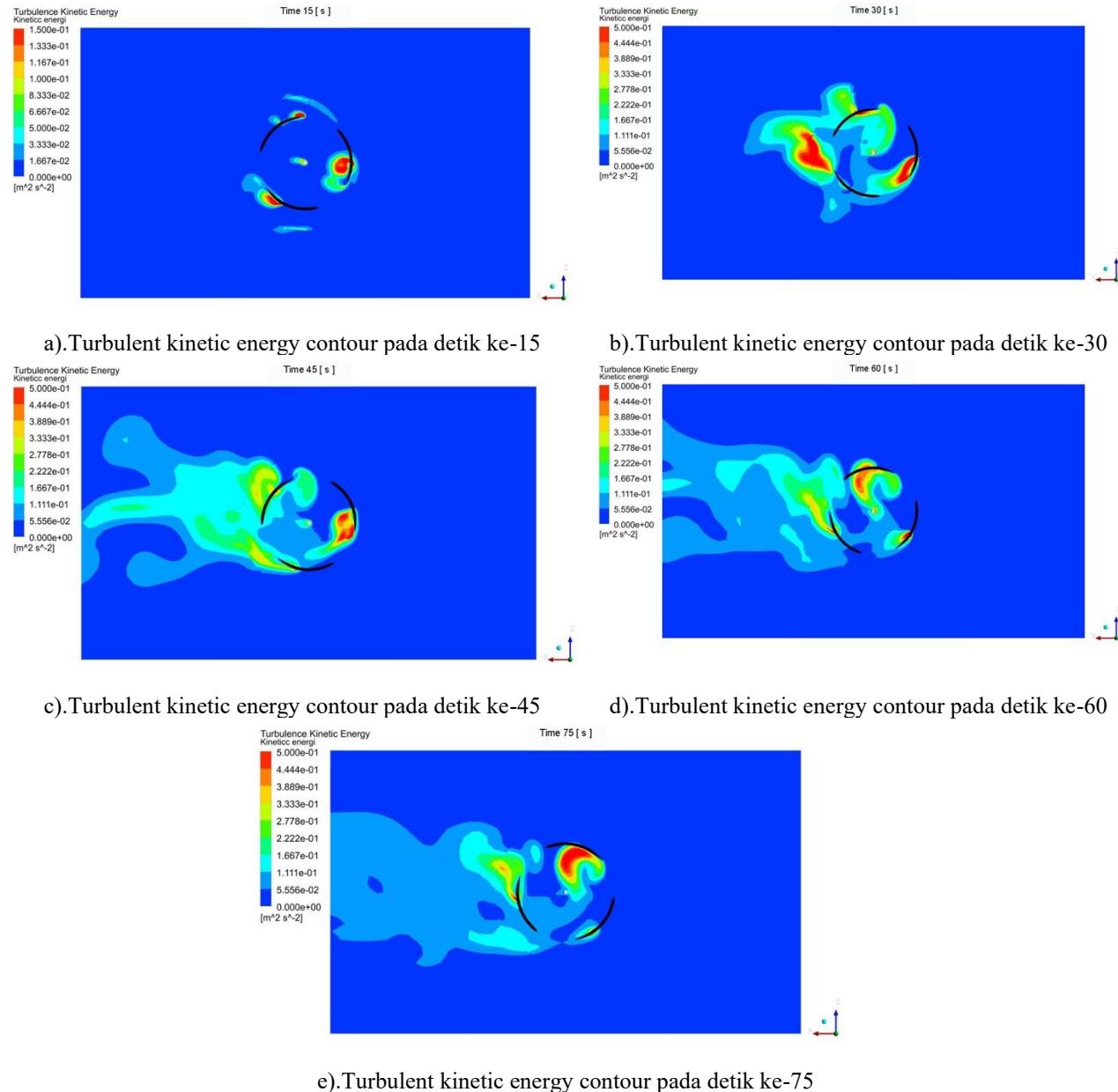


e). Pressure contour pada detik ke-75

Gambar 8. Pressure contour pada tiap periode waktu

4.3 Turbulent Kinetic Energi

Fluktuasi kecepatan dalam aliran fluida diidentifikasi melalui turbulent kinetic energi. Fluktuasi ini menyebabkan variasi dalam tekanan dan kecepatan aliran fluida di sekitar bilah turbin. Tingkat turbulensi yang tinggi dapat mengganggu aliran (laminar) yang diinginkan, sehingga menyebabkan ketidakstabilan aliran yang dapat mengurangi efisiensi turbin. Nilai turbulent kinetic energy tidak ideal dapat meningkatkan perpindahan panas dan transfer momentum antara fluida dan bilah turbin. Pada gambar 9, interaksi fluida dengan permukaan bilah turbin dapat diamati, turbulent kinetic energy dapat berdampak positif jika mengoptimalkan nilai turbulent kinetic energy di area kritis turbin, dalam simulasi ini adalah pada bagian *leading edge* aerofoil.

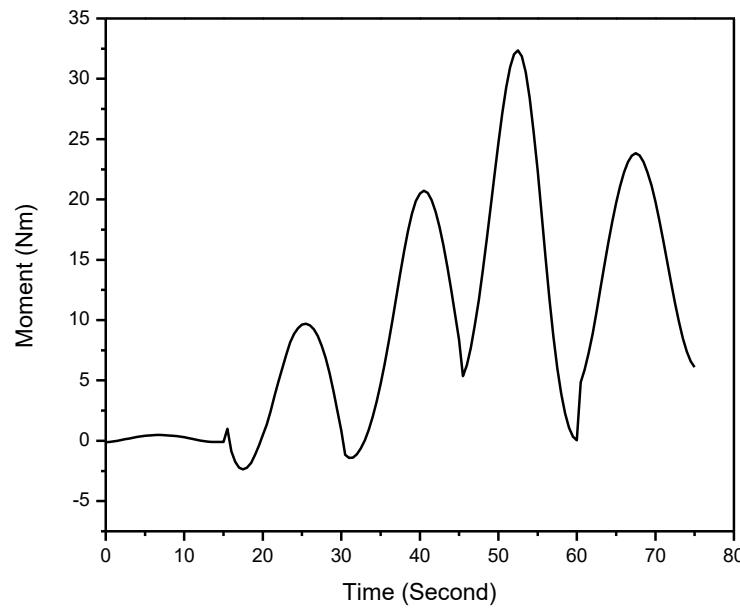


Gambar 9. Turbulent kinetic energy contour pada tiap periode waktu

4.4 Moment Gaya dan Coeficient Power

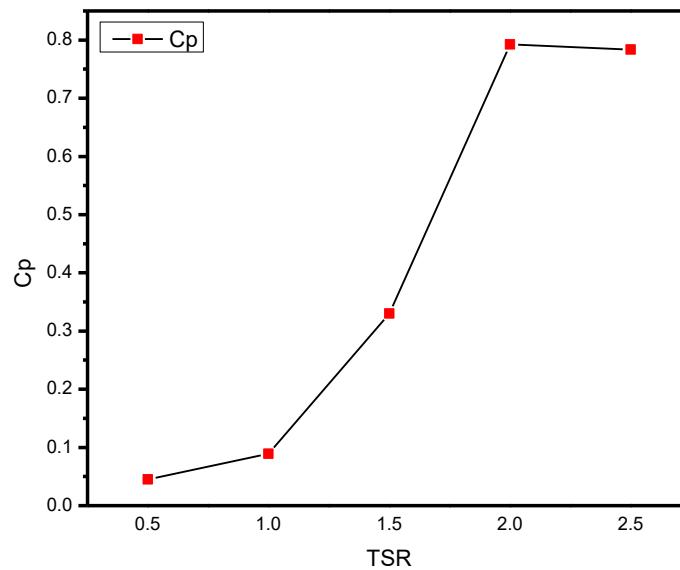
Pada Gambar 10 menggambarkan nilai moment gaya yang dihasilkan berbeda-beda pada setiap periode waktu tertentu. Nilai moment gaya yang dihasilkan turbin mempengaruhi terhadap efisiensi dari turbin. Pada waktu 15 detik pertama saat turbin berputar nilai torsi tertinggi yang dihasilkan adalah 0.243 Nm pada detik ke-11. Setelah itu nilai torsi yang dihasilkan menurun, hal ini mengindikasikan adanya perubahan kecepatan yang dihasilkan turbin pada periode waktu tersebut. Pada waktu ke 30 detik nilai torsi yang dihasilkan meningkat sebesar 9.25 Nm pada detik ke 25. Selanjutnya pada periode waktu ke 45 detik nilai torsi yang dihasilkan meningkat sebesar 20.84 Nm pada detik ke 41.

Nilai torsi tertinggi yang dihasilkan turbin berada di periode waktu ke 60 detik. Pada detik ke-53 nilai torsi yang dihasilkan sebesar 31.34 Nm.



Gambar 10. Grafik moment terhadap waktu

Gambar 11 menampilkan perbandingan nilai *coefficient power* yang dihasilkan dengan nilai TSR. Nilai TSR cenderung meningkat dari TSR 0.5 – 2 dan terlihat tidak ada kenaikan yang signifikan lagi setelah TSR 2.0. Terlihat pada TSR 2 nilai C_p mengalami sedikit penurunan, hal ini dapat dijelaskan pada Gambar 10 nilai torsi pada periode waktu ke 45-55 detik mencapai nilai torsi tertinggi dan pada periode waktu ke 75 nilai torsi yang dihasilkan menurun. Nilai torsi pada saat mencapai nilai C_p maksimum adalah 31.34 Nm dan pada saat TSR 2.5 nilai torsi yang dihasilkan adalah 24.45. Torsi yang dihasilkan pada TSR 0.5 – 2 meningkat dengan signifikan, akan tetapi ketika mencapai nilai torsi tertinggi terlihat penurunan nilai TSR



Gambar 11. Perbandingan C_p terhadap TSR

5. Kesimpulan

Penggunaan groove pada bilah turbin dapat membantu menaikkan nilai torsi. Peningkatan nilai torsi berpengaruh ke daya yang dihasilkan turbin. Penggunaan groove dapat mengoptimalkan aliran udara dan mengurangi gaya drag yang dihasilkan fluida, sehingga dapat meningkatkan efisiensi konversi energi dengan mengoptimalkan aliran fluida yang melalui permukaan sudu turbin. Nilai C_p tertinggi yang dihasilkan oleh turbin adalah 0.78 pada TSR 2. Nilai torsi yang dihasilkan mengalami kenaikan signifikan dibandingkan dengan nilai torsi yang dihasilkan pada turbin tanpa groove. Hal ini dikarenakan pemberian groove dapat mengurangi adanya *drag* antara aliran fluida yang mengalir di permukaan sudu, sehingga dapat mengoptimalkan nilai gaya *lift* yang dihasilkan turbin. Dengan lift yang lebih tinggi dan drag yang lebih rendah, nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin dengan groove cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan turbin tanpa groove. Pada kecepatan fluida yang tinggi groove membantu mengurangi risiko stall dan menjaga aliran udara tetap efisien, yang berarti torsi yang dihasilkan tetap optimal.

Daftar Pustaka

- [1] F. T. Hasanah, "Karakteristik wilayah daratan dan perairan Indonesia," *J. Geogr.*, vol. 20, no. 13, pp. 1–6, 2020.
- [2] I. Kurniawan, "Kajian Eksperimental dan Numerikal Turbin Air Helikal Gorlov Untuk Twist Angle 60," *J. Teknobiologi*, no. 1, pp. 7–13, 2014.
- [3] S. Kiho, M. Shiono, and K. Suzuki, "The power generation from tidal currents by Darrieus turbine," *Renew. Energy*, vol. 9, no. 1-4 SPEC. ISS., pp. 1242–1245, 1996, doi: 10.1016/0960-1481(96)88501-6.
- [4] J. Winchester and S. Quayle, "Torque ripple and variable blade force: A comparison of Darrieus and Gorlov-type turbines for tidal stream energy conversion," *Proc. 8th Eur. Wave Tidal Energy Conf.*, no. April, pp. 668–676, 2009, [Online]. Available: <http://eprints.lancs.ac.uk/53690/>
- [5] K. B. Reddy, A. C. Bhosale, and R. P. Saini, "Performance parameters of lift-based vertical axis hydrokinetic turbines - A review," *Ocean Eng.*, vol. 266, no. P4, p. 113089, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113089.
- [6] G. R. Mwaniki, M. O. Okok, and E. Oromat, "Expanding access to clean energy in developing countries: The role of off-grid mini hydro power projects in Kenya," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 9, no. 3, pp. 1571–1577, 2019, doi: 10.20508/ijrer.v9i3.9486.g7746.
- [7] A. Zhang, S. Liu, Y. Ma, C. Hu, and Z. Li, "Field tests on model efficiency of twin vertical axis helical hydrokinetic turbines," *Energy*, vol. 247, p. 123376, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123376.
- [8] A. H. Elbatran, O. B. Yaakob, Y. M. Ahmed, and H. M. Shabara, "Operation, performance and economic analysis of low head micro-hydropower turbines for rural and remote areas: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 40–50, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.11.045.
- [9] S. Pongduang, C. Kayankannavee, and Y. Tiaple, *Experimental Investigation of Helical Tidal Turbine Characteristics with Different Twists*, vol. 79. Elsevier B.V., 2015. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.511.
- [10] V. Jayaram and B. Bavanish, "Design and analysis of gorlov helical hydro turbine on index of revolution," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 77, pp. 32804–32821, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.181.
- [11] Z. Wang, Y. Wang, and M. Zhuang, "Improvement of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines with leading-edge serrations and helical blades using CFD and Taguchi method," *Energy Convers. Manag.*, vol. 177, no. May, pp. 107–121, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.09.028.
- [12] G. Saini and R. P. Saini, "Clearance and blockage effects on hydrodynamic performance of hybrid hydrokinetic turbine," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 57, no. April, p. 103210, 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103210.
- [13] 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.
- [14] D. Chen, Y. Ma, C. Hu, and T. Zhao, "Efficiency optimization of twin vertical-axis helical hydrokinetic turbines (VAHHTs) based on Taguchi method," *Appl. Ocean Res.*, vol. 138, no. April, p. 103618, 2023, doi: 10.1016/j.apor.2023.103618.
- [15] P. K. Yadav, A. Kumar, and S. Jaiswal, "A critical review of technologies for harnessing the power from flowing water using a hydrokinetic turbine to fulfill the energy need," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 2102–2117, 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.01.033.
- [16] V. Patel, V. Rathod, and C. Patel, "Optimal utilization of hydrokinetic energy resources through performance improvement of the darrieus turbine using concave and flat blocking plates," *Ocean Eng.*, vol. 283, no. April, p.

115099, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115099.

- [17] J. S. Tsai and F. Chen, “The conceptual design of a tidal power plant in Taiwan,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 2, no.