

ANALISIS TORSI YANG DIHASILKAN OLEH TURBIN GORLOV MENGGUNAKAN CFD UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

Mohamad Rizky Bagaskhara^{1*}, Joga Dharma Setiawan², Syaiful²

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: rizkybagas75@gmail.com

Abstrak

Studi ini berisikan penelitian turbin Gorlov dengan simulasi menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic*. Turbin Gorlov merupakan turbin dengan sumbu vertikal seperti turbin Savonius dan Darrieus. Turbin Gorlov memiliki kelebihan dapat digunakan pada perairan seperti laut atau sungai karena turbin ini dapat menerima aliran dari segala arah serta dapat memanfaatkan aliran fluida dengan kecepatan rendah. Penelitian ini dilakukan untuk mencari tahu pengaruh variasi TSR dengan torsi yang dihasilkan turbin Gorlov. Dengan hasil simulasi dan analisisnya, diharapkan studi ini dapat menjadi referensi untuk penelitian turbin Gorlov lainnya. Penelitian ini melakukan simulasi dengan dua bentuk geometri turbin, yaitu Turbin A dan Turbin B. Kedua geometri tersebut memiliki 3 blade airfoil berjenis NACA 4412. Pada simulasi CFD, metode yang digunakan untuk memutar turbin menggunakan MRF (*Motion Reference Frame*) dari ANSYS Fluent 2020 R1. Metode MRF dipilih karena metode ini dapat menetapkan kecepatan sudut/kecepatan putar turbin secara konstan. Data luaran dari simulasi ini adalah torsi yang dihasilkan dengan total 10 variasi TSR, terbagi menjadi 4 variasi TSR pada Turbin A dan 6 variasi TSR pada Turbin B. Hasil analisis Turbin A adalah peningkatan torsi berbanding lurus dengan peningkatan TSR. Sedangkan pada Turbin B mengalami peningkatan Torsi hingga TSR 1, namun mengalami penurunan pada TSR tinggi.

Kata kunci: cfd (*computational fluid dynamic*); mrf (*motion reference frame*); torsi; turbin gorlov; turbin pembangkit tenaga air

Abstract

This study contains Gorlov turbine research with simulations using CFD. Gorlov turbines are vertical-axis turbines like the Savonius and Darrieus turbines. Gorlov turbines have the advantage of being able to be used in waters such as seas or rivers because they can receive flow from all directions and can utilize low speed flow. This study was conducted to find out the effect of TSR variations with the torque produced by Gorlov turbines. With the results of the simulation and analysis, it is hoped that this study can be a reference for other research. This study conducted simulations with two forms of turbine geometry, namely Turbine A and Turbine B. Both geometries have 3 airfoil blades type NACA 4412. In the simulation, the method used to rotate the turbine uses Motion Reference Frame from ANSYS. MRF method was chosen because it can set the angular velocity constantly. The output data is the torque produced with a total of 10 TSR variations, divided into 4 TSR variations on Turbine A and 6 TSR variations on Turbine B. The result of Turbine A is that the increase in torque is directly proportional to the increase in TSR. While the B Turbine has increased Torque up to TSR 1, but decreased at high TSR.

Keywords: cfd (*computational fluid dynamic*); gorlov turbine; hydro power turbine; mrf (*motion reference frame*); torque

1. Pendahuluan

Di Indonesia, permintaan untuk tahun 2035 diperkirakan antara 903 – 1.229 TWh. Pada tahun tersebut diperkirakan kemampuan penyediaan listrik akan mencapai antara 215 – 270 GW yang didominasi oleh batubara [1]. Menurut data ESDM, dengan teknologi saat ini, potensi listrik dari energi terbarukan mencapai 432 GW, atau 7-8 kali lipat dari total kapasitas pembangkit terpasang saat ini [5]. Sumber energi terbarukan strategis yang telah dikembangkan dalam beberapa dekade terakhir di kawasan ini termasuk tenaga surya, angin, dan tenaga air [7].

Ada beberapa jenis Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) yang sering digunakan untuk generator, antara lain tipe Darrieus, Savonius, dan Gorlov. [2]. Turbin Gorlov dapat melakukan rpm tinggi di bawah kecepatan arus rendah tanpa kavitasi dan fluktuasi torsi [6]. Turbin Gorlov menggunakan airfoil sebagai bilah untuk membuat lift dan drag untuk memutar turbin. Dalam airfoil, aliran fluida melaluinya secara signifikan dipengaruhi oleh bentuk airfoil. Bentuk airfoil

memaksa untuk memotong aliran fluida sehingga terjadi perbedaan kecepatan pada permukaan atas airfoil dan permukaan bawah airfoil. Perbedaan kecepatan ini juga menyebabkan perbedaan tekanan [8]. Tetapi ada juga fenomena yang terjadi pada turbin Gorlov. Turbin yang berputar pada sumbu vertikal ini menyebabkan setiap airfoil tidak bertemu langsung dengan aliran udara yang stabil. Turbin yang berputar menyebabkan airfoil bertemu dengan udara yang sudah bergejolak karena kontak dengan airfoil sebelumnya [9]. Aliran turbulen ini bersentuhan dengan salah satu bilah dan berpotensi menghasilkan momen rendah.

Rasio kecepatan ujung (TSR) adalah rasio antara kecepatan linier ujung baling-baling dan kecepatan angin yang mendekat. [10] Ini digunakan oleh desainer turbin angin untuk mencocokkan dan mengoptimalkan satu set bilah dengan generator tertentu. TSR diberikan dengan membagi kecepatan ujung sudu turbin dengan kecepatan angin. Pada turbin vertikal, momen yang dihasilkan menghasilkan bentuk kurva. Tidak seperti turbin pada turbin horizontal yang selalu menghasilkan momen positif, turbin vertikal tidak selalu menghasilkan momen positif [11].

2. Metode Penelitian

Penelitian dimulai dengan studi literatur, diikuti dengan validasi. Validasi dilakukan dengan membandingkan simulasi dengan eksperimen. Setelah validasi tercapai, proses dilanjutkan dengan membuat geometri dan *mesh*. Pembuatan *mesh* harus menggunakan uji independensi grid. Kemandirian grid akan membandingkan beberapa jenis *mesh* dengan berbagai elemen untuk menentukan *mesh* terbaik yang telah independen sebagai hasilnya. Setelah kemandirian grid berhasil, dilakukan simulasi dengan berbagai variasi yang telah direncanakan.

Pembuatan pengujian geometri turbin untuk validasi mengacu pada hasil penelitian jurnal[4]. Tabel 1 di bawah ini adalah geometri turbin yang diuji dalam jurnal referensi. Tabel 2 menunjukkan hasil rata-rata data uji turbin. Pengujian turbin dilakukan dengan mengukur menggunakan sensor yang telah ditempatkan pada turbin dalam jangka waktu 100 detik.

Tabel 1. Menguji parameter turbin

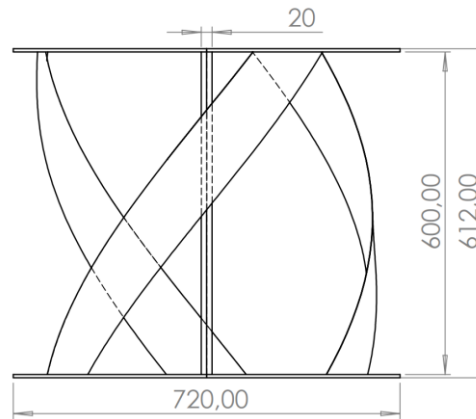
Parameter	Keterangan	Satuan
Height (<i>H</i>)	0.225	m
Diameter (<i>D</i>)	0.15	m
Chord Length	0.05	m
Airfoil Type	NACA 4412	-
Overlap Angle	90	deg
Index of Revolution	0.25	-
Number of Blade	3	-
Angle of Attack	0	deg

Tabel 2. Data rata-rata hasil tes

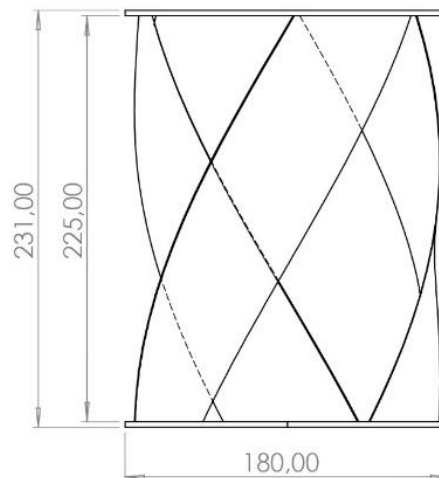
Parameter	Data
Torsi Rata-Rata Pengujian	0,009 Nm
Kecepatan Sudut Rata-Rata Pengujian	6,28 Rad/s
TSR Rata-Rata Pengujian	0,785
Kecepatan aliran fluida	0,6 m/s

Penelitian ini memiliki 2 jenis geometri turbin. Geometri pertama yang digunakan dalam simulasi CFD berbentuk jurnal tentang turbin Gorlov [3]. Geometri yang mengacu pada jurnal ini selanjutnya akan disebut sebagai turbin A. Kemudian, geometri kedua yang digunakan mengambil geometri turbin dalam pengujian. Geometri turbin uji ini selanjutnya akan disebut sebagai turbin B. Secara ukuran, turbin A memiliki diameter luar 72 cm, jauh lebih besar dari turbin B yang hanya memiliki diameter luar 18 cm. Untuk tinggi, turbin A memiliki tinggi total 61,2 cm, sedangkan turbin B hanya memiliki tinggi total 23,1 cm. Gambar 1 dan gambar 2 adalah geometri turbin yang digunakan dengan ukuran dimensi dalam mm.

Gambar 3 adalah gambar parameter domain simulasi. Domain ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian yang berputar dan bagian eksterior. Bagian luar akan diam, sedangkan bagian yang berputar akan berputar dengan kecepatan sudut yang telah ditentukan menggunakan metode kerangka referensi gerak. Di Ansys Fluent, metode ini menampilkan bingkai referensi gerak dan jaring dinamis. Fitur ini memungkinkan jerat tertentu yang dipilih untuk bergerak hingga 6 derajat kebebasan.



Gambar 1. Geometri Turbin A

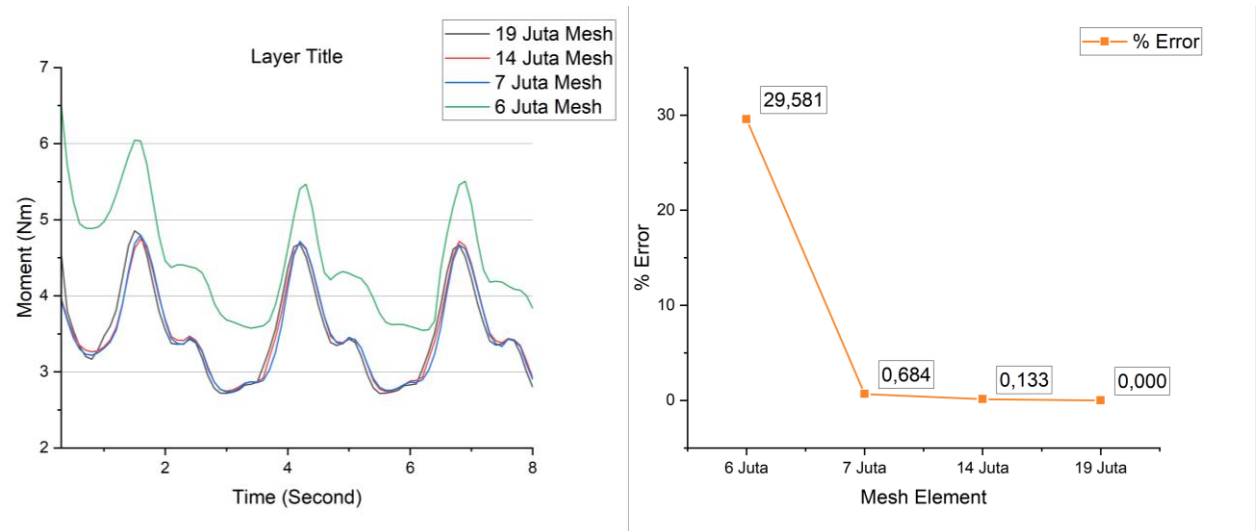


Gambar 2. Geometri Turbin B

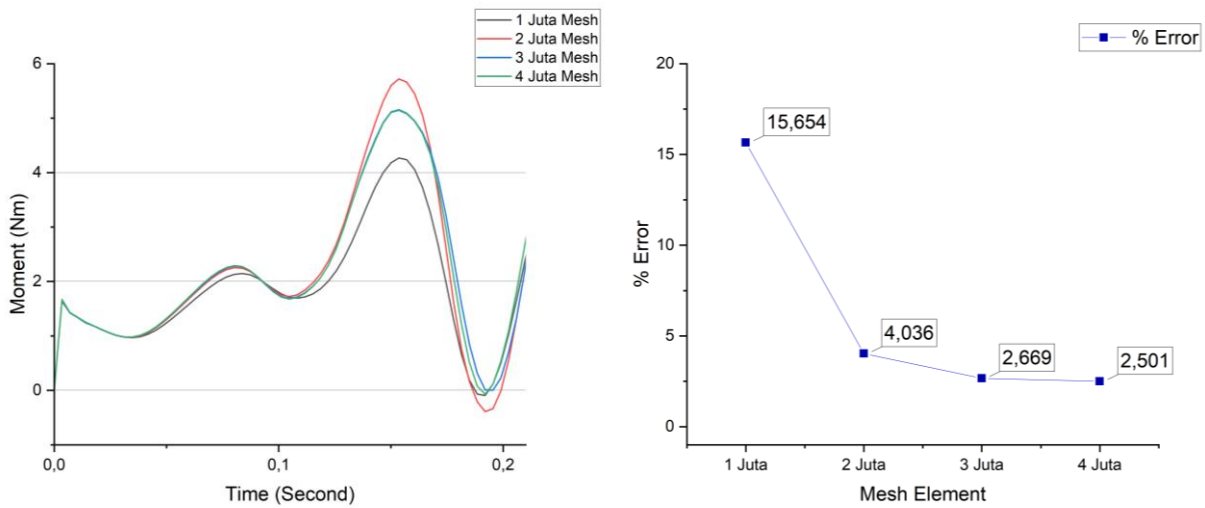
Moving reference frame dapat digunakan untuk mensimulasikan gerakan atau putaran benda tanpa mengubah *mesh*. Metode ini memungkinkan benda uji untuk bergerak berputar dengan kecepatan sudut yang konstan. MRF bekerja dengan cara memisahkan geometri *mesh* menjadi dua bagian berbeda, yaitu bagian *steady* untuk yang diam dan *rotating/moving* untuk bagian yang berputar/bergerak. Berbeda dengan MRF yang hanya memutar *mesh* dengan kondisi *mesh* tetap, *dynamic mesh* bekerja dengan cara mengubah bentuk *mesh* pada tiap time stepnya. *Dynamic mesh* merupakan pendekatan pada simulasi untuk kasus dengan kebutuhan komputasi aliran yang sangat dinamis. Ada tiga metode pada *dynamic mesh*, yaitu *smoothing*, *remeshing*, dan *layering* [12]. Perbedaan *dynamic mesh* ini juga terletak pada output hasilnya. Apabila MRF menghasilkan kecepatan putar yang konstan, *dynamic mesh* dapat menghasilkan kecepatan putar yang berubah-ubah pada tiap time stepnya.

Untuk simulasi turbin yang berputar, metode *dynamic mesh* ini juga dapat digunakan. Namun untuk melakukan simulasi dengan variasi TSR, pendekatan *dynamic mesh* tidak dapat digunakan karena metode ini tidak bisa menentukan kecepatan sudut turbin secara manual. Oleh karena itu, untuk menyimulasikan turbin vertikal dengan variasi berbagai kecepatan sudut yang konstan ini dapat menggunakan metode *moving reference frame* atau MRF.

Grafik hasil *grid independence* untuk turbin A dapat dilihat pada gambar 3, sedangkan *grid independence* untuk turbin B dapat dilihat pada gambar 4. Untuk Turbin A, pada grafik dapat disimpulkan bahwa *mesh* yang akurat dan efektif ada pada jumlah elemen 7 juta. Hal ini dikarenakan *mesh* dengan elemen 7 juta tidak memiliki *error* sebesar *mesh* dengan elemen 6 juta, namun tidak seberat *mesh* dengan elemen 14 juta dan 19 juta. Untuk Turbin B, pada grafik dapat disimpulkan bahwa *mesh* yang akurat dan efektif ada pada jumlah elemen 3 juta. Hal ini dikarenakan *mesh* dengan elemen 3 juta tidak memiliki *error* sebesar *mesh* dengan elemen 1 juta dan 2 juta, namun tidak seberat *mesh* dengan elemen 4 juta. Kesimpulan ini diambil dengan mempertimbangkan keakuratan perhitungan dan juga efisiensi waktu perhitungan. Dengan *error* yang lebih kecil, perhitungan dinilai semakin akurat.



Gambar 3. Grid independence turbin A.



Gambar 4. Grid independence turbin B.

Setelah pembuatan *mesh* dan *grid independence* selesai, dilanjutkan pada proses *setup*. *Setup* ini merupakan tempat untuk memasukkan parameter-parameter simulasi. Hal ini berkaitan dengan metode perhitungan yang digunakan, properti fluida, kondisi inlet, kondisi outlet, dll. Setelah menetapkan *setup*, langkah terakhir sebelum memulai kalkulasi adalah dengan menentukan *time step*. Penentuan *time step* ini cukup sederhana namun sangat berperan penting dalam keakuratan perhitungan. *Time step* ini begitu penting karena makin banyak *time step* pada satu periode turbin akan meningkatkan akurasi perhitungan. *Time step size* dihitung dari periode turbin, yaitu waktu yang dibutuhkan turbin untuk menyelesaikan satu putaran.

$$v_{linear} = \lambda \cdot v_{inlet} \quad (3.1)$$

$$\omega_{rad/s} = \frac{v_{linear}}{r} \quad (3.2)$$

$$\omega_{rpm} = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega_{rad/s} \quad (3.3)$$

$$T = \frac{60}{\omega_{rpm}} \quad (3.4)$$

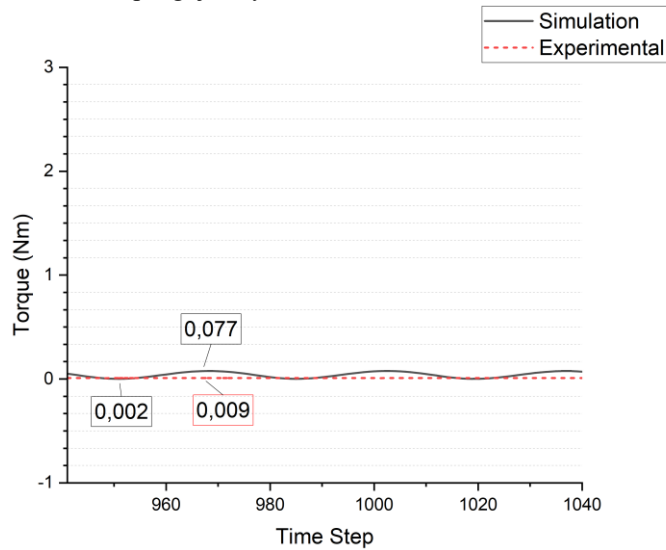
$$Time\ Step\ Size = \frac{T}{Time\ Step\ per\ Rotation} \quad (3.5)$$

Dalam simulasi ini dipilih *time step* sebanyak 90 untuk satu putaran turbin, karena dengan 90 *time step* berarti tiap *time stepnya* mencakup pergerakan turbin sebesar 4 derajat. Oleh karena itu pada persamaan 3.5 dapat memasukkan hasil pemilihan *time step per rotation*, yaitu 90.

Setelah simulasi selesai dilakukan, data-data yang dibutuhkan untuk analisis dapat diambil. Beberapa data yang diambil adalah kecepatan sudut, torsi, daya, dan koefisien daya. Koefisien daya dapat dihitung melalui perhitungan pada rumus dengan perbandingan daya dengan densitas, rasio soliditas, luas penampang, dan kecepatan aliran [3].

3. Hasil dan Pembahasan

Langkah awal dalam melakukan simulasi adalah dengan validasi terlebih dahulu. Validasi ini membandingkan hasil yang diperoleh dari simulasi dengan data eksperimen atau solusi analitik untuk memastikan bahwa hasil simulasi akurat dan dapat diandalkan. Gambar 5 adalah hasil validasi dengan membandingkan simulasi dan pengujian. Di mana garis lurus adalah hasil simulasi, sedangkan garis jingga putus-putus merupakan hasil pengujian. Pada simulasi validasi besaran aliran mengikuti hasil pengukuran arus ketika pengujian, yaitu 0,6 m/s



Gambar 5. Hasil validasi.

Tabel 3. Nilai torsi validasi.

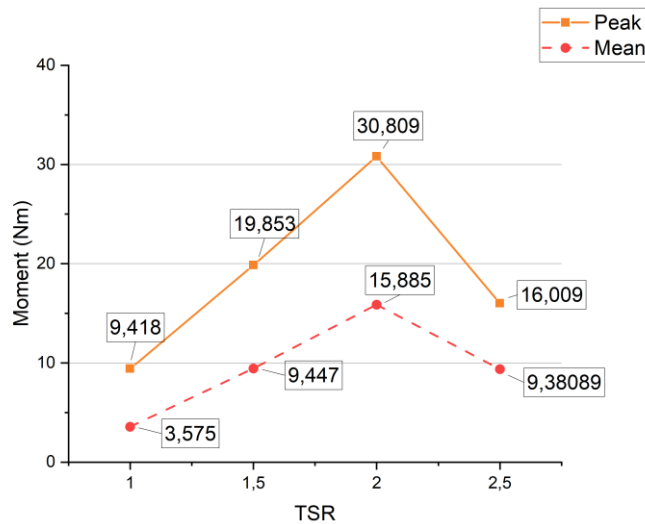
	Simulasi	Eksperimen
Torsi Tertinggi	0,0778 Nm	0,0099 Nm
Torsi Terendah	0,00183 Nm	0,0077 Nm
Torsi Rata-Rata	0,040 Nm	0,0090 Nm

Tabel 3 merupakan perbandingan data torsi antara simulasi dan pengujian. Torsi rata-rata simulasi didapatkan pada *time step* ke-62 sampai dengan *time step* ke-122. Pada tabel 3 dapat dilihat bahwa torsi yang dihasilkan pada pengujian memiliki fluktuasi nilai maksimum dan nilai minimum. Nilai maksimum dan minimum pada pengujian masih ada di dalam *range* data simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa data pengujian masih dianggap berhubungan dengan data simulasi.. Pada hasil berikut terdapat hasil simulasi pada turbin A dan B.

3.1 Turbin A

Pada geometri ini dilakukan simulasi dengan 4 macam variasi, yaitu TSR 1, TSR 1,5, TSR 2, dan TSR 2,5. Setup simulasi turbin A menggunakan aliran *inlet* sebesar 1,5 m/s. Gambar 7 merupakan grafik hasil simulasi pada turbin A. Semua simulasi turbin A merupakan hasil yang konvergen dan stabil. hal ini berarti sudah tidak ada perubahan signifikan pada kurva torsinya. Apabila grafik kurva masih belum stabil, simulasi akan terus dilanjutkan dengan menambah *time step*.

Analisis dilakukan pada hasil simulasi Turbin A dengan cara melakukan perbandingan dan membuat grafik untuk *peak moment* dan *mean moment*. *Peak moment* merupakan torsi tertinggi yang dihasilkan turbin tersebut. Sedangkan *mean moment* merupakan hasil rata-rata dari data kurva *moment* yang dihasilkan turbin. Hasil grafik perbandingan dapat dilihat pada gambar 6.

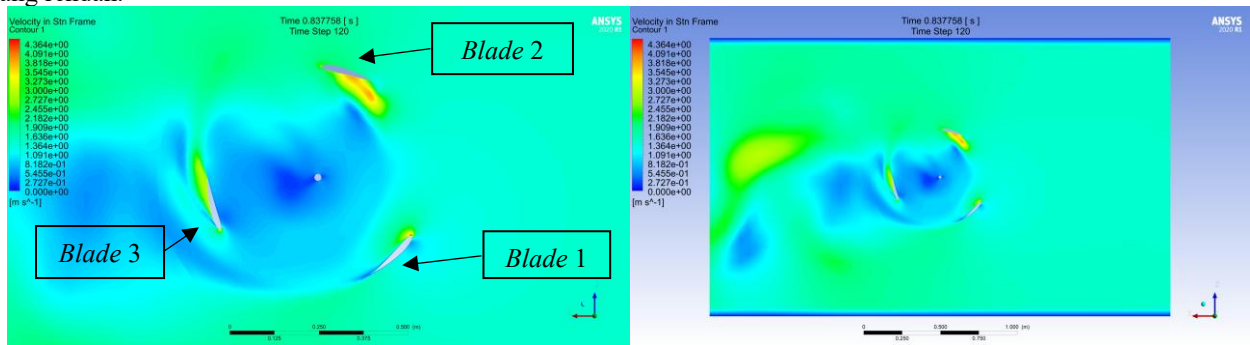


Gambar 6. Hasil simulasi turbin A.

Pada Turbin A menunjukkan hasil yang sangat baik di mana tiap kenaikan TSR berbanding lurus dengan *moment* yang dihasilkan. Namun ketika TSR 2,5 turbin A mengalami penurunan torsi *mean* dan *peak*. Hal ini dapat diartikan bahwa geometri Turbin A dapat bekerja paling optimal pada TSR 2. Selain itu Turbin A dapat beroperasi dengan baik pada TSR tinggi. Untuk hasil pada daya dan koefisien daya, nilai yang dihasilkan Turbin A relatif lebih jauh lebih besar dibandingkan Turbin B, hal ini dapat diakibatkan oleh faktor ukuran Turbin A yang jauh lebih besar sehingga dapat mengekstrak energi yang lebih besar juga.

Gambar 7 menunjukkan kontur kecepatan fluida pada turbin A TSR 2. Pada TSR 2 ini memiliki *mean* dan *peak* moment yang paling tinggi di antara variasi lainnya. Kontur ini diambil pada *time step* ke-120 atau pada waktu ke-0,838 detik. Pada waktu ini *blade 1* menghasilkan torsi yang lebih besar dibanding kedua *blade* lainnya. Dari data simulasi pada *time step* ini, *blade 1* menghasilkan 12,355 Nm, *blade 2* menghasilkan -2,202 Nm, dan *blade 3* menghasilkan -2,087 Nm. Total torsi yang terakumulasi pada *time step* ini adalah 8,066 Nm.

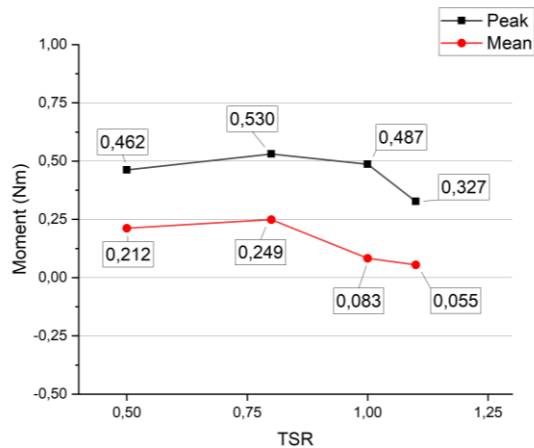
Pada gambar 7 dapat dilihat bahwa pada *blade 1* sedang mengalami kondisi di mana *blade* tersebut sedang dalam fase torsi tertingginya. Hal ini terjadi karena kondisi *leading edge blade 1* sedang menghadap ke arah datangnya aliran fluida. Sedangkan kedua *blade* lain yang membelakangi dan tegak lurus dengan arah aliran sedang mengalami *moment* yang rendah.



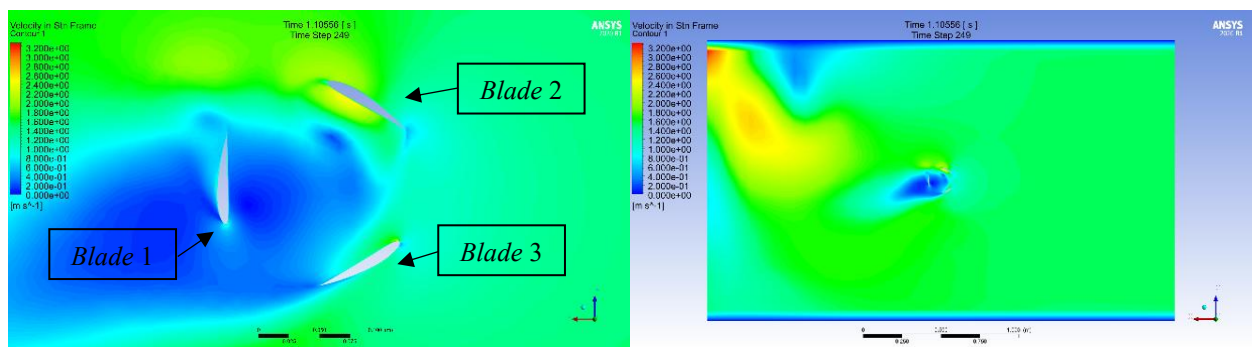
Gambar 7. Contour velocity turbin A TSR 2.

3.2 Turbin B

Pada geometri ini memiliki 3 *blade* dengan *airfoil* NACA 4412. Diameter turbin adalah 0,15 m dengan tinggi 0,3 m. Jika dibandingkan dengan turbin A, turbin B memiliki ukuran yang lebih kecil. Setup simulasi turbin B menggunakan aliran *inlet* sebesar 1,5 m/s. Pada Turbin B menghasilkan perbandingan torsi terhadap TSR yang berbeda dengan Turbin A. Pada Turbin B, di TSR 0.5 hingga TSR 0,8 menghasilkan kurva yang cukup stabil dan memiliki nilai torsi positif. Hal ini menunjukkan bahwa turbin dapat berputar dengan baik. Sedangkan pada TSR 1 hingga TSR 1,1 menghasilkan kurva yang mengalami fluktuasi torsi yang cukup besar. Pada hasil ini grafik torsi mengalami penurunan nilai hingga menjadi negatif setelah beberapa saat. Walaupun begitu rata-rata torsi yang dihasilkan pada TSR 0,5 hingga TSR 1,1 tetap bernilai positif. Untuk hasil daya dan koefisien daya dinilai cukup wajar walaupun nilainya kecil. Hal ini mirip seperti hasil pada hasil eksperimen yang memiliki nilai daya kecil. Semua simulasi turbin B merupakan hasil yang konvergen dan stabil. Gambar 8 merupakan grafik hasil simulasi pada turbin B.



Gambar 8. Hasil simulasi turbin B.



Gambar 9. Contour velocity turbin A TSR 0,8.

Gambar 9 merupakan *contour velocity* pada airfoil turbin B di TSR 0,8. Kontur ini diambil pada *time step* ke-249 atau pada waktu ke-1,106 detik. Pada waktu ini *blade 1* menghasilkan torsi yang lebih besar dibanding kedua *blade* lainnya. Dari data simulasi pada *time step* ini, *blade 1* menghasilkan -0,138 Nm, *blade 2* menghasilkan 0,090 Nm, dan *blade 3* menghasilkan 0,098 Nm. Total torsi yang terakumulasi pada *time step* ini adalah 0,050 Nm.

Pada hasil simulasi Turbin B menunjukkan bahwa kenaikan tiap kenaikan TSR akan berbanding lurus dengan peningkatan torsi maksimalnya, namun pada TSR tinggi turbin mengalami penurunan torsi. Hal ini berarti geometri Turbin B dinilai paling optimal beroperasi pada TSR 0.8.

4. Kesimpulan

Pada Turbin A menunjukkan hasil yang sangat baik di mana tiap kenaikan TSR berbanding lurus dengan *moment* yang dihasilkan. Namun ketika TSR 2,5 turbin A mengalami penurunan torsi *mean* dan *peak*. Hal ini dapat diartikan bahwa geometri Turbin A dapat bekerja paling optimal pada TSR 2. Selain itu Turbin A dapat beroperasi dengan baik pada TSR tinggi. Sedangkan untuk kekurangan dari Turbin A adalah bentuknya yang relatif cukup besar dan dinilai cukup sulit untuk ditempatkan pada sungai-sungai kecil.

Dari hasil simulasi Turbin B menunjukkan bahwa kinerja Turbin B paling optimal ada pada TSR 0.8. Setelah TSR 0.8, turbin mengalami penurunan *moment* pada TSR 1 hingga TSR 1,1. Walaupun turbin ini hanya dapat optimal pada TSR rendah, namun Turbin B ini memiliki keuntungan pada bentuknya yang kecil dan ramping. Bentuk kecil ini dapat ditempatkan pada sungai-sungai kecil yang tidak begitu dalam.

Kedua geometri turbin memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Terlepas dari segala kekurangannya, keduanya membuktikan performanya masing-masing sesuai kapasitasnya. Apabila ditempatkan dengan tepat, kedua geometri ini dapat direalisasikan sebagai pembangkit listrik bertenaga *hydro* dengan baik.

5. Daftar Pustaka

- [1] Burhannuddin, M., Abdulkadir, M., & Yawara, E. (2020). *Turbin Gorlov Sumbu Vertikal Dengan Profil NACA 0012 Dengan Sudut Puntir 45°*. 01(01), 39–45.
- [2] Wardhana, W., Keniraras, N., Pratama, R. S., & Rahmawati, S. (2021). Hydrodynamics Performance Analysis of Vertical Axis Water Turbine (VAWT) Gorlov Type Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 698(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/698/1/012022>.

- [3] Jayaram, V., & Bavanish, B. (2022a). A Brief Study on the Influence of the Index of Revolution on the Performance of Gorlov Helical Turbine. *International Journal of Renewable Energy Research*, 12(2), 827–845. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v12i2.12880.g8468>.
- [4] Jayaram, V., & Bavanish, B. (2022b). Design and analysis of gorlov helical hydro turbine on index of revolution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(77), 32804–32821. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.181>
- [5] Tampubolon, A. P., & Adiatma, J. C. (2019). Laporan Status Energi Bersih Indonesia. *Iesr*, 1–23. www.iesr.or.id
- [6] Moghimi, M., & Motawej, H. (2020). Investigation of Effective Parameters on Gorlov Vertical Axis Wind Turbine. *Fluid Dynamics*, 55(3), 345–363. <https://doi.org/10.1134/S0015462820030106>
- [7] Sakti, A. D., Rohayani, P., Izzah, N. A., Toya, N. A., Hadi, P. O., Octavianti, T., Harjupa, W., Caraka, R. E., Kim, Y., Avtar, R., Puttanapong, N., Lin, C. H., & Wikantika, K. (2023). Spatial integration framework of solar, wind, and hydropower energy potential in Southeast Asia. *Scientific Reports*, 13(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25570-y>
- [8] Liu, T. (2021). Evolutionary understanding of airfoil lift. *Advances in Aerodynamics*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s42774-021-00089-4>
- [9] Le Fouest, S., & Mulleners, K. (2022). The Dynamic Stall Dilemma for Vertical-Axis Wind Turbines. *Renewable Energy*, 198(April), 505–520. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.071>
- [10] Hosseini, A., Cannon, D. T., & Vassel-Behagh, A. (2022). Tip Speed Ratio Optimization: More Energy Production with Reduced Rotor Speed. *Wind*, 2(4), 691–711. <https://doi.org/10.3390/wind2040036>
- [11] Howell, R., Qin, N., Edwards, J., & Durrani, N. (2010). Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 35(2), 412–422. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.025>
- [12] Chang, P., Xu, G., & Huang, J. (2020). Numerical study on DPM dispersion and distribution in an underground development face based on dynamic mesh. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(4), 471–475. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.005>