

SIMULASI DAN ANALISIS INTERAKSI FLUIDA STRUKTUR TURBIN GORLOV AIRFOIL NACA 0015

*Zulfa Baihaqi Al Khakim¹, Achmad Widodo², Ismoyo Haryanto²

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: bhq013@gmail.com

Abstrak

Turbin Gorlov merupakan jenis turbin angin sumbu vertikal yang dirancang untuk menghasilkan daya secara optimal pada kecepatan angin rendah hingga sedang, di mana salah satu elemen kunci peningkatan performanya adalah pemilihan desain airfoil yang tepat. Penelitian ini bertujuan menganalisis performa aerodinamika dan respon struktural turbin Gorlov dengan menggunakan *airfoil* NACA 0015 melalui pendekatan *Fluid-Structure Interaction* (FSI) atau interaksi fluida struktur yang memungkinkan evaluasi terpadu interaksi antara beban fluida dan respons struktur bilah turbin dalam berbagai kondisi operasional. Model geometri turbin dikembangkan menggunakan perangkat lunak CAD dan dianalisis secara numerik dengan metode elemen hingga untuk mengevaluasi distribusi tegangan, pola deformasi, serta kestabilan aliran udara di sekitar bilah. Analisis struktural difokuskan pada identifikasi titik kritis tegangan *Von Mises* dan deformasi maksimum yang berpotensi memicu kegagalan material, kemudian dihitung nilai *safety factor* untuk menilai ketahanan struktural bilah terhadap beban aerodinamika. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan dasar bagi perancangan turbin Gorlov yang efisien, stabil, dan berumur panjang, serta menjadi referensi dalam pengembangan turbin angin vertikal yang lebih andal dan berpotensi diterapkan sebagai sumber energi terbarukan di daerah dengan potensi angin rendah hingga sedang.

Kata kunci : *airfoil* naca 0015; deformasi; faktor keamanan; interaksi fluida struktur (fsi); tegangan struktural; turbin gorlov

Abstract

The Gorlov turbine is a type of vertical-axis wind turbine designed to generate power optimally at low to medium wind speeds, where one of the key elements in enhancing its performance lies in the proper selection of airfoil design. This study aims to analyze the aerodynamic performance and structural response of the Gorlov turbine using the NACA 0015 airfoil through a Fluid-Structure Interaction (FSI) approach, which enables an integrated evaluation of the interaction between fluid loads and the structural response of the turbine blades under various operating conditions. The turbine geometry model was developed using CAD software and numerically analyzed with the finite element method to evaluate stress distribution, deformation patterns, and airflow stability around the blades. The structural analysis focused on identifying critical points of Von Mises stress and maximum deformation that may trigger material failure, followed by the calculation of the safety factor to assess the structural reliability of the blades under aerodynamic loads. The findings are expected to provide a foundation for designing a more efficient, stable, and durable Gorlov turbine, as well as serve as a reference in the development of vertical-axis wind turbines that are reliable and potentially applicable as renewable energy sources in regions with low to medium wind potential.

Keywords: *deformation; fluid-structure interaction (fsi); gorlov turbine; naca 0015 airfoil; safety factor; structural stress*

1. Pendahuluan

Kebutuhan akan sumber energi terbarukan semakin meningkat seiring dengan menurunnya cadangan bahan bakar fosil dan dampak negatif yang ditimbulkan terhadap lingkungan, sehingga energi angin menjadi salah satu alternatif potensial dalam penyediaan energi bersih dan berkelanjutan. Di antara berbagai jenis turbin angin, turbin angin vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine/VAWT*) memiliki beberapa keunggulan, seperti desain yang lebih fleksibel, kemampuan beroperasi pada arah angin yang berubah-ubah, serta tingkat kebisingan yang lebih rendah dibandingkan turbin angin horizontal. Salah satu jenis VAWT yang menarik untuk dikaji yaitu turbin Gorlov, yang memiliki bilah heliks dengan koefisien daya maksimum lebih rendah dibandingkan desain Darrieus konvensional, namun menawarkan rentang rasio kecepatan ujung (*Tip Speed Ratio/TSR*) yang lebih luas di sekitar koefisien daya maksimum, sehingga memungkinkan transfer daya yang efisien dengan kebutuhan kontrol yang rendah. Desain heliksnya juga meningkatkan masa pakai turbin,

mengurangi getaran, serta memberikan kemampuan *self-start* yang lebih baik dibandingkan turbin Darrieus dengan bilah lurus, menjadikannya lebih sesuai untuk aplikasi pada kecepatan angin rendah, termasuk di lingkungan perkotaan [1].

Dalam konteks ini, pemilihan airfoil menjadi elemen penting yang memengaruhi performa aerodinamika turbin. Penelitian ini menganalisis performa turbin Gorlov dengan menggunakan airfoil NACA 0015 melalui pendekatan *Fluid-Structure Interaction* (FSI), yaitu metode numerik yang memungkinkan analisis antara aliran fluida dan respons struktural bilah turbin.

2. Landasan Teori

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan salah satu bentuk pemanfaatan energi terbarukan yang mengubah energi angin menjadi energi listrik, di mana kontribusinya mencapai sekitar seperempat dari total listrik berbasis energi terbarukan dan mampu menghasilkan listrik dengan biaya rendah jika ditinjau dari *levelized cost of energy* [2]. PLTB umumnya terdiri atas satu atau lebih turbin angin dan digunakan pada pembangkitan skala besar, dengan memanfaatkan kecepatan angin optimal dalam kisaran 2,0–3,5 m/s, sedangkan kecepatan di atas rentang tersebut berpotensi merusak kincir atau turbin [3]. Turbin angin sendiri merupakan perangkat konversi energi yang digunakan untuk memutar generator listrik, dan diklasifikasikan menjadi dua jenis utama berdasarkan orientasi sumbu rotasinya, yaitu turbin angin sumbu horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine/HAWT*) dan turbin angin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine/VAWT*) [4]. HAWT banyak diaplikasikan pada pembangkit listrik berskala besar dengan arah angin yang relatif konsisten, sedangkan VAWT lebih unggul pada kondisi arah angin yang berubah-ubah, tidak memerlukan sistem pengarah, dan cocok untuk aplikasi skala kecil [5]. Salah satu varian VAWT yang berkembang adalah Turbin Heliks Gorlov (*Gorlov Helical Turbine/GHT*), yaitu hasil modifikasi dari turbin Darrieus dengan bilah heliks yang mampu mengurangi fluktuasi torsi, menghasilkan putaran yang lebih stabil, meningkatkan efisiensi, serta memperbaiki kemampuan *self-start* [6].

Persamaan kontinuitas untuk kasus ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad \text{Persamaan 1}$$

Dalam pengembangannya, salah satu aspek penting untuk memahami kinerja GHT adalah pemodelan interaksi fluida-struktur (*Fluid-Structure Interaction/FSI*), yaitu pendekatan komputasi yang mengintegrasikan analisis dinamika fluida (*Computational Fluid Dynamics/CFD*) dan analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis/FEA*) untuk mengevaluasi efek beban fluida terhadap respons struktural serta umpan balik deformasi struktur terhadap medan aliran [7]. Persamaan momentum (hukum kekekalan momentum) untuk fluida kompresibel dalam simulasi FSI:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{f} \quad \text{Persamaan 2}$$

Metode FSI dapat dilakukan dengan pendekatan *one-way*, yang mengabaikan pengaruh deformasi terhadap aliran, maupun *two-way*, yang mempertimbangkan interaksi dinamis timbal balik antara aliran dan struktur [8]. Secara matematis, total gaya fluida yang bekerja pada permukaan struktur dapat dirumuskan sebagai:

$$\mathbf{f} = -p \mathbf{n} + \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} \quad \text{Persamaan 3}$$

Dalam analisis *Fluid-Structure Interaction* (FSI), distribusi beban fluida pada bilah turbin menghasilkan respons struktural berupa tegangan yang kemudian dievaluasi menggunakan kriteria *Von Mises*. Tegangan *Von Mises* digunakan untuk memprediksi kemungkinan luluh material berdasarkan teori distorsi energi, dengan membandingkan nilai tegangan ekuivalen terhadap tegangan leleh material (*yielding*).

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad \text{Persamaan 4}$$

Dengan menggunakan tegangan *Von Mises*, analisis kegagalan menjadi lebih sederhana karena kondisi tegangan kompleks dapat dibandingkan langsung dengan tegangan luluh material (σ_y), jika $\sigma_{VM} \geq \sigma_y$ maka material dianggap mengalami leleh (*yielding*).

3. Bahan dan Metode Penelitian

3.1 Pemodelan Geometri

Tahap awal penelitian dilakukan dengan membuat model 3D turbin angin Gorlov menggunakan INVENTOR 2025, mencakup seluruh komponen utama seperti bilah, rotor, dan poros. Dimensi turbin memiliki lebar diameter 0,66 m dan tinggi 0,62. Model yang telah dibuat kemudian dipindahkan ke *Ansys Fluent 2022 R1* untuk proses *meshing* serta penentuan kondisi batas sebelum dilakukan simulasi.

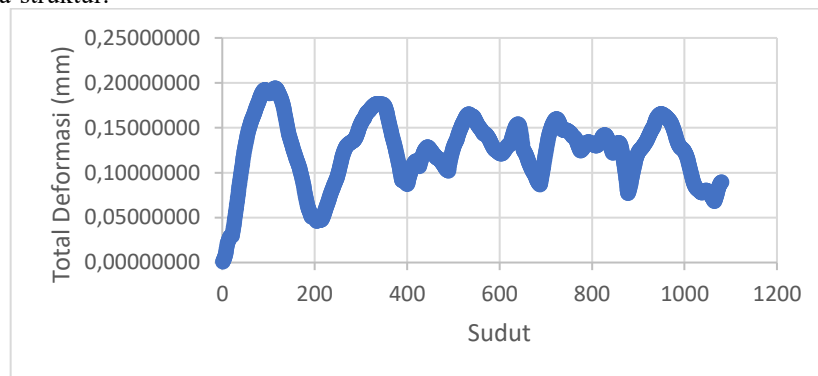
3.2 Proses *Meshing* dan Kondisi Batas

Penentuan domain dalam penelitian ini mengacu pada studi numerik yang dilakukan oleh Marzec (2020) guna meminimalkan pengaruh *boundary condition* terhadap hasil perhitungan [9]. Ukuran domain ditetapkan dengan ketinggian 20D, lebar 40D, jarak 20D dari inlet ke turbin, serta jarak 40D dari turbin ke outlet. Pada bagian *rotatingzone*

menggunakan *mesh* dengan tipe Tetrahedron. Jumlah *mesh* total untuk perhitungan numerik ini adalah sekitar 4 juta. Pengaturan *boundary condition* diawali dengan pemilihan model turbulensi $k-\omega$ SST dan persamaan energi dipergunakan. Kecepatan angin diset pada fitur *inlet* dan mengubah kecepatan menjadi 39,252 m/s [10]. Pada bagian *cell zone condition* menjadi *mesh motion* dan mengatur kecepatan rotasi dengan TSR turbin adalah 3,2. Mengubah aturan *solution method*, *report* dan *calculation activities*. Berikutnya, memasukkan material yang ada di *transient structural* dan mengatur menu *solution* untuk mendapatkan hasil dari total deformasi, tegangan *von-mises* dan regangan *von-mises*.

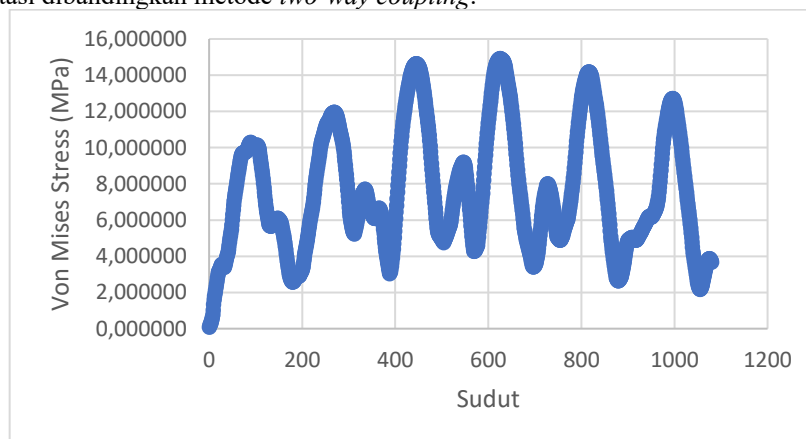
4. Hasil dan Pembahasan

Analisis deformasi struktur turbin angin Gorlov dilakukan untuk mengetahui respons mekanis bilah terhadap beban aerodinamis. Parameter utama yang diamati adalah deformasi maksimum yang menunjukkan perubahan bentuk terbesar akibat interaksi fluida-struktur.



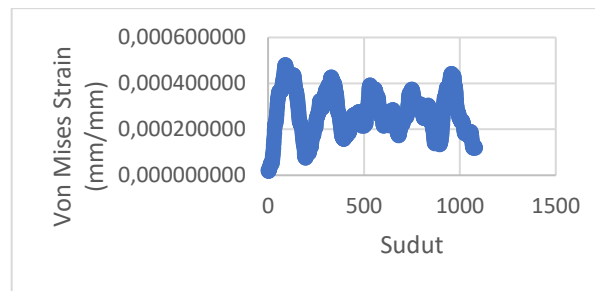
Gambar 1. Grafik total deformasi terhadap sudut rotasi turbin.

Grafik pada gambar 1 memperlihatkan bahwa deformasi mengalami fluktuasi dengan pola periodik sepanjang rotasi penuh turbin. Nilai deformasi maksimum berada di sekitar 0,2 mm, sedangkan nilai minimumnya mendekati 0,00 mm. Fluktuasi deformasi terjadi secara berulang pada setiap siklus rotasi akibat distribusi gaya aerodinamis yang berubah-ubah sepanjang perputaran. Meskipun demikian, deformasi yang dihasilkan tetap tidak cukup besar untuk memengaruhi pola aliran fluida secara signifikan. Oleh karena itu, penerapan metode FSI *one-way coupling* tetap dianggap tepat. Pada metode ini, beban aerodinamis hasil perhitungan fluida diterapkan langsung pada struktur untuk menghitung respons deformasi, tanpa memperhitungkan umpan balik dari struktur ke fluida. Dengan metode *one-way* membuat simulasi lebih efisien secara komputasi dibandingkan metode *two-way coupling*.



Gambar 1. Grafik Von Mises Stress terhadap sudut rotasi turbin.

Nilai tegangan *Von Mises* berkisar antara 2 MPa hingga 15 MPa, dengan beberapa puncak yang terlihat jelas pada sudut tertentu, seperti sekitar 300°, 600°, dan 800°. Lonjakan ini menunjukkan adanya momen ketika bilah menerima beban aerodinamis lebih besar akibat orientasi terhadap aliran fluida. Sebaliknya, pada sudut lain seperti sekitar 150° dan 950°, nilai tegangan menurun hingga mendekati 2–4 MPa, menandakan kondisi beban aerodinamis relatif kecil. Pada Gambar 2 memperlihatkan bahwa karakteristik dinamis dari turbin Gorlov di mana bilah mengalami siklus pembebanan berulang setiap rotasi penuh. Tegangan yang berfluktuasi harus diperhatikan karena mempengaruhi material tersebut, karena meskipun deformasi yang terjadi kecil, siklus tegangan yang berulang dapat memicu kegagalan material dalam jangka panjang.



Gambar 3. Grafik *Von Mises Strain* terhadap sudut rotasi turbin.

Dari pola fluktuasi pada Gambar 3, regangan *Von Mises* tidak bersifat konstan, melainkan berubah-ubah secara signifikan seiring dengan variasi orientasi bilah terhadap arah aliran fluida. Nilai regangan berkisar antara sekitar 0,0001 mm/mm hingga 0,0005 mm/mm, dengan beberapa titik puncak dan lembah yang jelas. Puncak regangan tertinggi muncul pada sudut sekitar 100°, 350°, 600°, dan 950°, masing-masing mendekati nilai 0,0005 mm/mm, yang menandakan kondisi bilah menerima beban aerodinamis paling tinggi akibat kombinasi gaya angkat dan hambat maksimum.

Sebaliknya, pada sudut tertentu seperti sekitar 200° dan 400°, regangan menurun drastis hingga mendekati nilai minimum, menunjukkan bilah berada dalam posisi dengan beban aerodinamis relatif kecil. Secara umum, regangan maksimum yang tercatat relatif kecil jika dibandingkan dengan batas regangan plastis material umum, sehingga bilah turbin masih berada pada kondisi aman dan tidak mengalami deformasi permanen.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dipaparkan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut untuk menjawab rumusan masalah penelitian:

1. Deformasi total maksimum yang terjadi adalah sekitar 0,2 mm. Nilai ini relatif kecil dan dapat diabaikan, mengindikasikan bahwa struktur turbin tidak mengalami perubahan bentuk yang signifikan saat beroperasi, sehingga menjaga efisiensi dan stabilitasnya.
2. Grafik tegangan *Von Mises* menunjukkan bahwa tegangan puncak yang terjadi adalah sekitar 15 MPa. Angka ini masih jauh dari tegangan luluh material, yang sekali lagi mendukung kesimpulan bahwa desain ini aman. Fluktuasi tegangan dan regangan yang sejalan dengan perputaran turbin menunjukkan perilaku struktural yang sesuai dengan model hidrodinamik.
3. Sebagian besar komponen turbin memiliki nilai faktor keamanan tinggi. Namun, terdapat area dengan nilai minimum safety factor sekitar 2. Kondisi ini mengindikasikan adanya konsentrasi tegangan pada titik-titik tertentu yang berpotensi menjadi lokasi kritis terhadap kegagalan struktural apabila beban meningkat secara signifikan.

6. Daftar Pustaka

- [1] Garschi, B., Zareian, M. and Hashemi Tari, P., 2024. Evaluation of a Gorlov Wind Turbine Design with J-Shaped Airfoil. Available at SSRN 5017302.
- [2] Pelczar, S., 2025. Assessment of the theoretical potential of onshore wind power plants in Poland in the context of the required distance from residential buildings. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 75, p.104250.
- [3] Abdillah, M.R., Santoso, A.D. and Nofandi, F., 2024. Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Untuk Daya Lampu Navigasi. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 5(2), pp.61–68.
- [4] Fahmi, M.R.A., Adietya, B.A. and Budiarto, U., 2018. Analisa Teknis Dan Ekonomis Penggunaan Wind Turbine Untuk Konversi Daya Listrik Peralatan Kesehatan Pada Kapal Rumah Sakit. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 6(1).
- [5] Rianto, M.A., Sudarti, S. and Yushardi, Y., 2022. Analisis Teoritis Penggunaan Jenis Turbin Angin Terhadap Output Daya Listrik. *Jurnal Inovasi Mesin*, 4(2), pp.18–25.
- [6] Jayaram, V. and Bavanish, B., 2022. Design and analysis of Gorlov helical hydro turbine on index of revolution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(77), pp.32804–32821.
- [7] Wu, X., Niu, S. and Li, C., 2021. The study of the dynamic response of the natural gas pipeline aerial crossing during pigging process: A Review. *Journal of Fluids and Structures*, 105, p.103339.
- [8] Kalbuadhi, G.A., Tauviqirrahman, M. and Jamari, J., 2021. Analisis Pengaruh Tekstur Permukaan Berupa Square Dimple Pada Komponen Femoral Head Terhadap Performa Artificial Hip Joint Pada Gerakan Membungkuk Dengan Metode Two-Way Fluid Structure Interaction (FSI). *Jurnal Teknik Mesin*, 9(3), pp.449–452.
- [9] Ł. Marzec, Z. Buliński, and T. Krysiński, "Fluid structure interaction analysis of the operating Savonius wind turbine," *Renew. Energy*, vol. 164, pp. 272–284, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.08.145.
- [10] Badan Pusat Statistik Kabupaten Pacitan, 2025. Kabupaten Pacitan Dalam Angka 2025 Volume 39, 2025. Katalog: 1102001.3501, ISSN: 0215.5710.