

ANALISIS MODAL DAN INTERAKSI STRUKTUR-FLUIDA TURBIN ANGIN SAVONIUS MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

*Ahmad Shodikin¹, Ismoyo Haryanto², Gunawan Dwi Haryadi²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: ahmadshodikin480@gmail.com

Abstrak

Turbin angin Savonius merupakan turbin sumbu vertikal yang mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah, namun memiliki tantangan terkait efisiensi dan respon struktural akibat beban aerodinamika. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik dinamis turbin Savonius melalui kajian modal dan interaksi struktur-fluida menggunakan metode elemen hingga dengan pendekatan *one-way coupling*. Simulasi dilakukan pada kecepatan angin 11,32 m/s dengan kecepatan putar 33,96 rad/s. Hasil analisis modal menunjukkan frekuensi alami mode pertama sebesar 21,41 Hz, lebih tinggi dibanding frekuensi eksitasi turbin 5,41 Hz sehingga aman dari risiko resonansi. Analisis struktur menunjukkan tegangan von Mises maksimum 19,53 MPa dan von Mises strain 0,000317524 mm/mm pada sudut rotasi 835 derajat. Pada posisi yang sama, *safety factor* terendah tercatat sebesar 14,34. Sementara itu, deformasi maksimum sebesar 0,485 mm terjadi pada sudut 916 derajat. Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa beban aerodinamika berpengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan, deformasi, dan *safety factor* turbin. Kajian ini memberikan pemahaman penting mengenai perilaku dinamis turbin Savonius serta menjadi dasar untuk pengembangan desain yang lebih andal dan efisien.

Kata kunci : deformasi; frekuensi pribadi; *one way coupling*; *safety factor*

Abstract

The Savonius wind turbine is a vertical axis turbine capable of operating at low wind speeds but faces challenges in efficiency and structural response due to aerodynamic loads. This study analyzes its dynamic characteristics through modal analysis and fluid-structure interaction using the finite element method with a one-way coupling approach. Simulations were carried out at a wind speed of 11.32 m/s and a rotational speed of 33.96 rad/s. The modal analysis showed that the first natural frequency was 21.41 Hz, higher than the turbine excitation frequency of 5.41 Hz, indicating safety against resonance. Structural analysis revealed a maximum von Mises stress of 19.53 MPa and a von Mises strain of 0.000317524 mm/mm at a rotation angle of 835 degrees, where the lowest safety factor of 14.34 was also found. The maximum deformation of 0.485 mm occurred at 916 degrees. Overall, the results confirm that aerodynamic loads significantly influence stress distribution, deformation, and shifts in natural frequency. This study provides valuable insights into the dynamic behavior of Savonius turbines and serves as a foundation for more reliable and efficient designs.

Keywords: deformation; natural frequency; one-way coupling; safety factor

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi terbarukan mendorong pengembangan turbin angin, salah satunya tipe Savonius yang cocok untuk kecepatan angin rendah karena desain sederhana dan kemampuan *self-starting* [1]. Namun, performa struktur turbin sangat dipengaruhi interaksi antara beban fluida dan respons mekanik. Pendekatan *one-way coupling* sering digunakan dalam analisis *fluid-structure interaction* (FSI) karena lebih efisien, meskipun deformasi struktur tidak memengaruhi aliran kembali [2].

Analisis modal dengan metode elemen hingga penting untuk menentukan frekuensi alami agar tidak terjadi resonansi dengan frekuensi eksitasi turbin [3]. Studi terbaru menunjukkan FSI memengaruhi distribusi tegangan, deformasi, dan umur pakai komponen turbin [4]. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis modal dan FSI satu arah pada turbin Savonius untuk mengevaluasi frekuensi alami, tegangan von Mises, regangan, deformasi, dan *safety factor* pada kondisi operasi tertentu.

2. Landasan Teori

Turbin angin Savonius merupakan jenis turbin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine*) yang bekerja dengan prinsip gaya drag, sehingga dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah dan memiliki kemampuan *self-starting*. Desainnya sederhana, biaya pembuatan rendah, serta cocok digunakan di daerah perkotaan dengan arah angin turbulen, meskipun efisiensinya relatif rendah dibanding turbin *lift-based* [1] [2] [4].

Analisis modal berperan penting untuk menentukan frekuensi alami dan bentuk mode getaran sehingga dapat menghindari resonansi. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa kehadiran fluida menurunkan frekuensi alami struktur akibat efek *added mass* dan redaman fluida [5] [6]. Pendekatan ini juga telah diterapkan secara numerik pada turbin arus laut, di mana CFD dan analisis modal digabungkan untuk mengevaluasi respons struktural terhadap beban fluida serta dampaknya pada kelelahan material dan kinerja turbin [7]. Oleh karena itu, analisis modal dan interaksi struktur–fluida pada turbin Savonius menjadi penting untuk menjamin keamanan, keandalan, serta umur pakai turbin.

Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk mencari frekuensi alami struktur :

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = \{0\} \quad \text{Persamaan 1}$$

Persamaan 1 adalah dasar analisis getaran struktur. Di dalamnya, [K] menyatakan matriks kekakuan, [M] matriks massa, ω frekuensi alami, dan $\{\phi\}$ mode bentuk getaran. Persamaan ini menghasilkan frekuensi alami serta mode shape melalui penyelesaian eigenvalue, yang penting untuk memahami perilaku dinamik struktur dan menghindari resonansi.

Metode Elemen Hingga (FEM) adalah teknik numerik untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial yang menggambarkan perilaku fisik dalam sistem teknik, terutama dalam mekanika struktur. Dalam pendekatan ini, struktur dibagi menjadi elemen-elemen kecil dengan fungsi interpolasi sederhana, kemudian dihitung secara lokal dan dijumlahkan untuk menghasilkan solusi global seperti tegangan, deformasi, atau respons dinamis.

Dalam konteks industri turbin angin, FEM telah banyak digunakan untuk menganalisis karakteristik dinamis dan kekuatan struktur komponen turbin. Misalnya, pada penggunaan FEM dalam perangkat lunak ABAQUS untuk melakukan analisis modal pada bilah turbin horizontal, menghasilkan respons vibrasi dan distribusi gaya akar serta simpangan ujung bilah [8]. Selain itu, simulasi elemen hingga juga digunakan untuk mengevaluasi ketahanan struktur bilah komposit sepanjang 5 m terhadap beban ekstrem, meliputi analisis buckling dan kerusakan progresif [9].

Berikut adalah persamaan yang digunakan dalam FEM :

$$[k]\{u\} = [F] \quad \text{Persamaan 2}$$

Persamaan 2 adalah dasar metode elemen hingga (FEM), di mana [k] merepresentasikan kekakuan struktur, $\{u\}$ adalah vektor perpindahan, dan [F] vektor gaya luar. Persamaan ini menunjukkan bahwa deformasi struktur ditentukan oleh gaya yang bekerja dan sifat kekakuannya.

Von Mises stress adalah parameter yang digunakan untuk memprediksi kegagalan plastis pada material duktile berdasarkan teori energi distorsi, dengan menggabungkan komponen tegangan normal dan geser menjadi satu nilai ekuivalen. Sementara itu, von Mises strain merepresentasikan regangan ekuivalen akibat distorsi energi. Kedua parameter ini banyak digunakan dalam analisis struktur untuk menilai keamanan desain. Penelitian yang dilakukan oleh Wang et.al (2021) mengusulkan metode sederhana untuk merekonstruksi kurva tegangan–regangan penuh berbasis hipotesis von Mises dari data uji terbatas; bermanfaat untuk input FEM ketika data material tidak lengkap [10], serta dalam simulasi interaksi fluida-struktur bilah turbin untuk menganalisis distribusi deformasi dan mengevaluasi risiko kegagalan berdasar kriteria von Mises stress [11].

Berikut adalah persamaan untuk tegangan Von Mises :

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad \text{Persamaan 3}$$

Persamaan 3 digunakan untuk menghitung tegangan von Mises σ_v dari tegangan utama σ_1 , σ_2 , dan σ_3 . Tegangan von Mises menyederhanakan kondisi tegangan kompleks menjadi satu nilai ekuivalen yang dapat dibandingkan dengan tegangan leleh material

Untuk regangan Von Mises, persamaan matematisnya adalah sebagai berikut:

$$\varepsilon_v = \sqrt{\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}{2}} \quad \text{Persamaan 4}$$

Persamaan 4 adalah rumus Von Mises Strain ε_v , yang menghitung regangan ekuivalen dari perbedaan antar principal strain ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$). Nilai ini merepresentasikan deformasi gabungan material sehingga kondisi regangan dapat dievaluasi lebih sederhana dibandingkan melihat tiap regangan utama secara terpisah

Deformasi adalah perubahan bentuk atau ukuran suatu material akibat pengaruh beban eksternal, yang dapat bersifat elastis maupun plastis. Dalam konteks turbin angin, deformasi penting untuk mengevaluasi respons struktural terhadap beban fluida. Penelitian Al-Balushi et al. (2023) menunjukkan deformasi baling-baling turbin meningkat seiring kenaikan kecepatan angin [12], sedangkan Zhang et al. (2024) membuktikan pengukuran deformasi dinamis dapat dilakukan secara akurat dengan metode 3D-DIC [13].

Safety factor adalah rasio antara kekuatan material atau struktur terhadap beban aktual yang dioperasikan, yang berfungsi untuk mengatasi berbagai ketidakpastian dalam desain teknik. Sebagai contoh, dalam desain menara turbin angin, penggunaan safety factor parsial yang dikalibrasi melalui pendekatan reliabilitas meningkatkan keandalan dan keamanan desain [14]. Sementara itu, dalam analisis kelelahan, nilai safety factor dinamis yang lebih besar dari standar konvensional dipilih untuk memastikan keawetan dan ketahanan struktur terhadap beban siklik dalam jangka lama

3. Bahan dan Metode Penelitian

3.1 Geometri

Rotor memiliki diameter sebesar 600 mm dan tinggi 600 mm dengan poros utama berdiameter 30 mm yang berfungsi sebagai penopang sekaligus penghubung dengan sistem transmisi. Pada bagian atas dan bawah rotor dipasang dua disk berbentuk lingkaran dengan diameter 660 mm dan ketebalan 3 mm.

3.2 Pemodelan Meshing dan Boundary Condition

Domain simulasi memiliki dimensi sebesar 20D pada arah ketinggian, 40D pada lebar, dengan jarak inlet terhadap turbin sejauh 20D dan jarak outlet sejauh 40D. Mesh yang digunakan sebagai input di Ansys bertipe Tetrahedron dengan penerapan *body sizing* dan *face sizing* pada beberapa bagian tertentu. Selain itu, *mesh inflation* diterapkan pada area transisi fluida menuju turbin, terutama di sekitar ujung sudu. Jumlah elemen mesh keseluruhan pada perhitungan numerik ini mencapai kurang lebih 16 juta. Pada kondisi batas, digunakan model turbulensi $k-\omega$ SST serta persamaan energi, dengan kecepatan angin sebesar 11,32 m/s dan kecepatan putar turbin 33,96 rad/s.. Pada sisi struktural, kondisi batas ditetapkan dengan *fix support* pada bagian bawah turbin dan *remote displacement* pada bagian atas turbin, dengan pembebanan berupa *rotational velocity* sebesar 33,96 rad/s. Pada *remote displacement*, hanya diperkenankan terjadi rotasi pada sumbu y dan perpindahan pada arah x.

4. Hasil dan Pembahasan

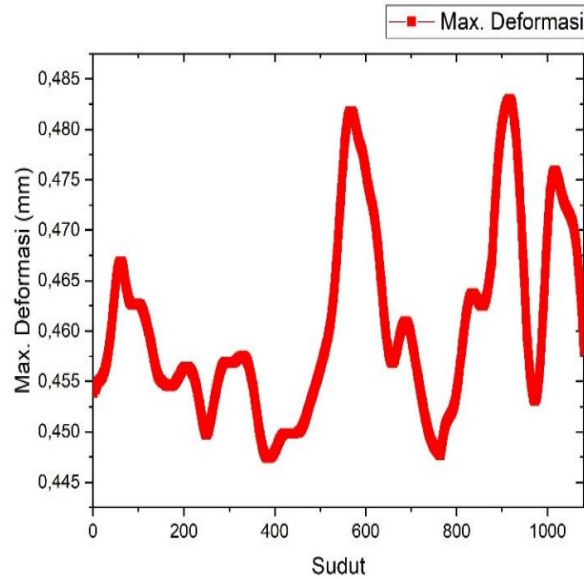
Hasil perhitungan frekuensi alami dari simulasi metode elemen hingga ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Frekuensi Alami pada Setiap Mode Getar

Mode	Frekuensi
1	21,41
2	45,33
3	45,41
4	45,46
5	45,59
6	74,39
7	93,04
8	93,27
9	93,74

Hasil analisis modal menunjukkan frekuensi alami turbin Savonius berada pada rentang 21,41–96,50 Hz, jauh di atas frekuensi eksitasi turbin sebesar 5,41 Hz. Hal ini menandakan operasi turbin pada kecepatan nominalnya aman dan tidak berpotensi menimbulkan resonansi.

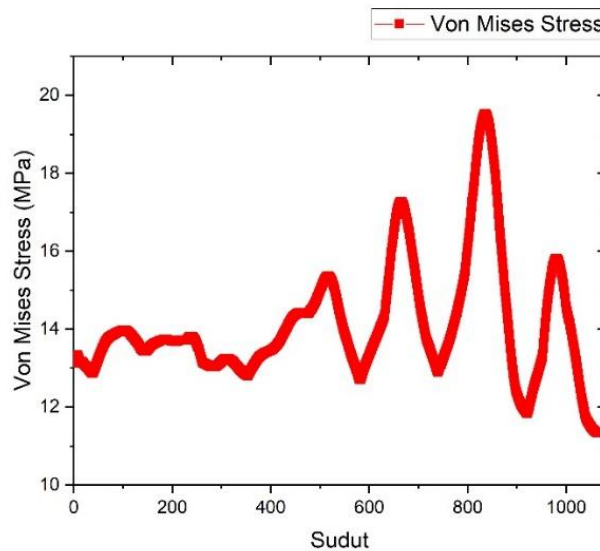
Grafik 4.1 berikut menyajikan hubungan antara sudut putar terhadap deformasi maksimum yang terjadi pada bilah. Dari grafik ini dapat diamati fluktuasi deformasi yang menunjukkan pengaruh distribusi beban aerodinamis pada setiap posisi sudut.



Gambar 1. Grafik Maksimum Deformasi terhadap Sudut Putar

Gambar 1 menunjukkan grafik deformasi berfluktuasi seiring perubahan sudut, dengan nilai minimum sekitar 0,445 mm dan maksimum 0,485 mm pada sudut 916°. Fluktuasi ini dipengaruhi distribusi tekanan fluida yang bervariasi pada bilah selama rotasi.

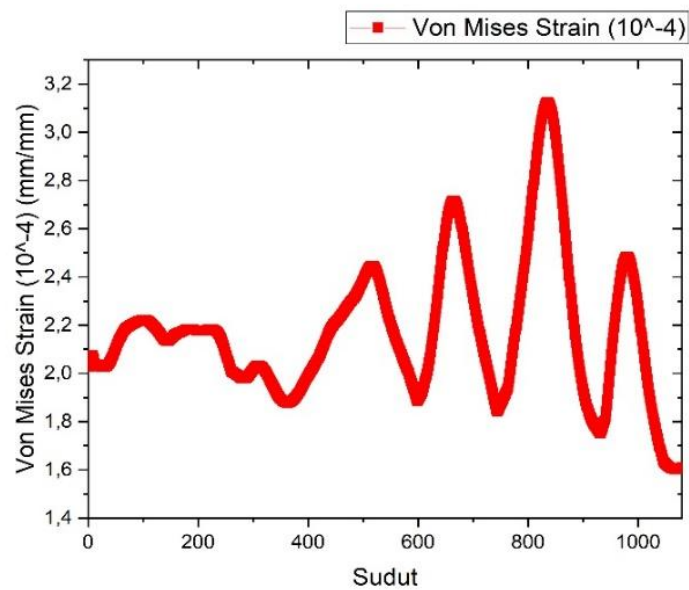
Gambar 2 menampilkan grafik hubungan sudut putar turbin dengan distribusi tegangan Von Mises, yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi tegangan gabungan material. Grafik juga menunjukkan variasi tegangan dan titik kritis dengan nilai maksimum.



Gambar 2. Grafik Maksimum Von Mises Stress terhadap Sudut Putar

Gambar 2 menunjukkan variasi tegangan Von Mises terhadap sudut, dengan rentang 11–20 MPa. Pada sudut 0–400°, tegangan relatif stabil sekitar 12–14 MPa, lalu meningkat hingga 16 MPa pada 500–700°. Nilai maksimum sekitar 19–20 MPa terjadi pada sudut 820–840°, sebagai kondisi kritis struktur. Setelah itu, tegangan berfluktuasi hingga 1080° dengan beberapa puncak sekunder, mencerminkan respons dinamis akibat distribusi beban aerodinamis.

Sedangkan untuk Von Mises *strain*, Gambar 3 menunjukkan grafik hubungan sudut putar turbin dengan Von Mises Strain, yang merepresentasikan deformasi regangan gabungan akibat beban dinamis. Pola perubahan regangan ini memudahkan identifikasi titik kritis dengan regangan maksimum.



Gambar 3. Grafik Maksimum Von Mises *Strain* terhadap Sudut Putar

Gambar 3 menunjukkan grafik variasi Von Mises Strain terhadap sudut putar turbin dengan rentang $1,6 \times 10^{-4}$ hingga $3,2 \times 10^{-4}$ mm/mm. Pada sudut awal ($0-400^\circ$), regangan stabil sekitar $2,0 \times 10^{-4}$ mm/mm, lalu meningkat pada $500-700^\circ$ hingga $2,6 \times 10^{-4}$ mm/mm. Puncak maksimum terjadi pada $820-850^\circ$ dengan nilai mendekati $3,2 \times 10^{-4}$ mm/mm, menunjukkan titik kritis deformasi. Setelah itu, regangan berfluktuasi dengan beberapa puncak sekunder namun cenderung menurun mendekati 1080° , menandakan sifat dinamis akibat variasi beban aerodinamis.

Hasil simulasi menunjukkan faktor keamanan minimum 14,338 pada sambungan sudu turbin dengan *lower disk*, sedangkan bagian lain lebih tinggi. Hal ini menandakan struktur tetap sangat aman karena nilai faktor keamanan jauh di atas batas.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dipaparkan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil analisis modal, diperoleh bahwa turbin angin Savonius memiliki frekuensi pribadi pada rentang nilai 21,41 Hz, 45,33–45,59 Hz, 74,39 Hz, serta 93,04–93,74 Hz. Nilai frekuensi ini menjadi dasar penting dalam mengevaluasi kemungkinan terjadinya resonansi saat turbin beroperasi.
2. Turbin dioperasikan pada kecepatan sudut 33,96 rad/s dengan frekuensi putar sebesar 5,405 Hz. Dengan demikian, bisa dikatakan bahwa struktur masih aman dari potensi resonansi dikarenakan frekuensi putar jauh dibawah frekuensi mode pertamanya.
3. Hasil simulasi FSI menunjukkan bahwa deformasi maksimum yang terjadi pada turbin angin Savonius adalah sebesar 0,48 mm. Nilai ini muncul pada saat sudut operasi mencapai 916° , yang menunjukkan kondisi beban maksimum. Meskipun demikian, nilai deformasi ini tergolong kecil sehingga tidak mengganggu kestabilan struktur turbin.
4. Berdasarkan hasil analisis, tegangan von-Mises maksimum yang diterima struktur adalah sebesar 19,52 MPa, yang terjadi pada sudut 835° . Pada kondisi sudut yang sama, regangan ekuivalen von-Mises maksimum yang dicapai adalah 0,00031 mm/mm. Lokasi tegangan dan regangan maksimum terletak pada sambungan antara sudu turbin dan pelat bawah, yang menjadi daerah kritis struktur.
5. Nilai faktor keamanan (*safety factor*) minimum yang diperoleh dari simulasi adalah sebesar 14,338 pada sudut 835° . Nilai ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat konsentrasi tegangan pada area tertentu, struktur turbin angin Savonius masih berada dalam kondisi yang sangat aman karena *safety factor* jauh melebihi batas minimum desain yang umumnya digunakan.

6. Daftar Pustaka

- [1] H. Im and B. Kim, "Power Performance Analysis Based on Savonius Wind Turbine Blade Design and Layout Optimization through Rotor Wake Flow Analysis," *Energies*, vol. 15, no. 24, p. 9500, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15249500>.

-
- [2] Z. Huque, F. Zemmouri, H. Lu, and R. R. Kommalapati, “Fluid–Structure Interaction Simulations of Wind Turbine Blades with Pointed Tips,” *Energies*, vol. 17, no. 5, p. 1090, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/en17051090>.
- [3] C. Grinderslev, N. N. Sørensen, S. G. Horcas, N. Troldborg, and F. Zahle, “Wind turbines in atmospheric flow: fluid–structure interaction simulations with hybrid turbulence modeling,” *Wind Energy Science*, vol. 6, no. 3, pp. 627–643, May 2021, doi: <https://doi.org/10.5194/wes-6-627-2021>.
- [4] Abdullah Al Noman *et al.*, “Savonius wind turbine blade design and performance evaluation using ANN-based virtual clone: A new approach,” *Heliyon*, vol. 9, no. 5, pp. e15672–e15672, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15672>.
- [5] D. Liu, X. Xia, J. Yang, and Z. Wang, “Effect of Boundary Conditions on Fluid–Structure Coupled Modal Analysis of Runners,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 434–434, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/jmse9040434>.
- [6] J. Duan, C. Li, and J. Jin, “Modal Analysis of Tubing Considering the Effect of Fluid–Structure Interaction,” *Energies*, vol. 15, no. 2, pp. 670–670, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15020670>.
- [7] H. Ullah, M. Hussain, N. Abbas, H. Ahmad, M. Amer, and M. Noman, “Numerical investigation of modal and fatigue performance of a horizontal axis tidal current turbine using fluid–structure interaction,” *Journal of Ocean Engineering and Science*, vol. 4, no. 4, pp. 328–337, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.joes.2019.05.008>.
- [8] N. Navadeh, I. Goroshko, Y. Zhuk, F. Etminan Moghadam, and A. Soleiman Fallah, “Finite Element Analysis of Wind Turbine Blade Vibrations,” *Vibration*, vol. 4, no. 2, pp. 310–322, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/vibration4020020>.
- [9] C. Muyan and D. Coker, “Finite element simulations for investigating the strength characteristics of a 5 m composite wind turbine blade,” *Wind Energy Science*, vol. 5, no. 4, pp. 1339–1358, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.5194/wes-5-1339-2020>.
- [10] Y.-Z. Wang, G.-Q. Li, Y.-B. Wang, and Y.-F. Lyu, “Simplified method to identify full von Mises stress-strain curve of structural metals,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 181, p. 106624, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106624>.
- [11] Ö. ÖĞÜÇLÜ, “Structural Design and Stress Analysis of A Helical Vertical Axis Wind Turbine Blade,” *Sakarya University Journal of Science*, vol. 24, no. 6, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.16984/aufenbilder.719223>.
- [12] Ahmed Al-Balushi, K. Alam, M. Iqbal, A. Husain, A. Ahmad, and Abullah Al-Amrani, “Modelling and Analysis of Deformation and Stresses in Horizontal Axis Wind Turbine,” *CFD letters*, vol. 15, no. 2, pp. 16–24, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.37934/cfdl.15.2.1624>.
- [13] L. Zhang, J. Jia, S. Shao, W. Gao, and D. Niu, “Experimental Investigation of the Dynamic Deformation of Wind Turbine Blades Based on 3D-Digital Image Correlation,” *Energies*, vol. 17, no. 24, p. 6330, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/en17246330>.
- [14] S. Al-Sanad, L. Wang, J. Parol, and A. Kolios, “Reliability-based design optimisation framework for wind turbine towers,” *Renewable Energy*, vol. 167, pp. 942–953, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.022>.