

REVOLUSI ENERGI TERBARUKAN DESAIN INOVATIF TURBIN ANGIN SPIRAL ARCHIMEDES YANG TERINTEGRASI DENGAN PANEL SURYA

REVOLUTION RENEWABLE ENERGY AN INNOVATIVE DESIGN OF ARCHIMEDES SPIRAL WIND TURBINE INTEGRATED WITH SOLAR PANELS

Sihmaulana Dwianto¹⁾, Ardianto Syaifur Rohman²⁾, Tunjung Genarsih³⁾, Audha Fitrah Aulina⁴⁾

^{1,2,3}Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Jember, Jember, Indonesia

⁴Program Studi Mesin Otomotif, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Jember, Jember, Indonesia
email: sihmaulana@polije.ac.id¹⁾, ardianto.sr@polije.ac.id²⁾, tunjung.genarsih@polije.ac.id³⁾, audha_fitrah@polije.ac.id⁴⁾

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktural dan performa aerodinamis dari *Archimedes Screw Wind Turbine* (ASWT) yang terintegrasi dengan panel surya sebagai sistem energi terbarukan hibrida. Metode yang digunakan mencakup simulasi statis menggunakan analisis elemen hingga (FEA) dan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) menggunakan perangkat lunak Ansys. Desain turbin terdiri dari tiga bilah spiral berbahan aluminium 6061-T6, dengan parameter utama: diameter luar 300 mm, panjang bilah 137,4 mm, ketebalan 1,5 mm, dan sudut kemiringan 65°. Beban angin divariasikan pada kecepatan 50–100 m/s dari arah depan dan samping, serta diterapkan pula pada tiang penyangga. Hasil simulasi statis menunjukkan bahwa tegangan maksimum sebesar 19,8 MPa (*frontal*), 27,67 MPa (*lateral*), dan 2,6 MPa (penyangga) masih jauh di bawah batas luluh material 276 MPa. Sementara itu, simulasi CFD dengan kecepatan inlet 7 m/s dan variasi Tip Speed Ratio (TSR) antara 4 hingga 10 menunjukkan efisiensi optimal pada TSR 7–8. Penurunan performa pada TSR tinggi disebabkan oleh efek solid wall dan terbentuknya *wake vortex*. Secara keseluruhan, desain ASWT yang terintegrasi dengan panel surya dinyatakan aman secara struktural dan efisien secara aerodinamis, meskipun diperlukan optimasi lanjutan terhadap geometri bilah dan pengendalian TSR.

Kata kunci: Sistem energi hibrida, ASWT, panel surya, paduan aluminium 6061, analisis struktural, analisis CFD.

Abstract

This study aims to analyze the structural strength and aerodynamic performance of an Archimedes Screw Wind Turbine (ASWT) integrated with solar panels as a hybrid renewable energy system. The methodology includes static simulations using Finite Element Analysis (FEA) and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations conducted with Ansys software. The turbine design consists of three spiral blades made of aluminum 6061-T6, with key parameters: an outer diameter of 300 mm, blade length of 137.4 mm, blade thickness of 1.5 mm, and

Received:
12 Maret 2025

Accepted:
12 Juni 2025

Published:
13 Juni 2025



a tilt angle of 65°. Wind loads were applied at speeds ranging from 50–100 m/s from frontal and lateral directions, as well as on the support structure. The static simulation results showed maximum stresses of 19.8 MPa (frontal), 27.67 MPa (lateral), and 2.6 MPa (support), all well below the material's yield strength of 276 MPa. CFD simulations with a 7 m/s inlet velocity and Tip Speed Ratio (TSR) ranging from 4 to 10 indicated optimal aerodynamic performance at TSR values of 7–8. Efficiency decreased at higher TSR due to solid wall effects and wake vortex formation. Overall, the ASWT-solar panel design is structurally safe and aerodynamically efficient, though further optimization of blade geometry and TSR control is recommended to enhance system performance.

Keywords: hybrid energy system, ASWT, solar panel, aluminum alloy 6061, structural analysis, CFD analysis

DOI:10.20527/sjmekinematika.v10i1.723

How to cite: Dwianto, S., Rohman, A.S, Genarsih, T., Aulina, A.F. "Revolutionizing Renewable Energy an Innovative Design of Archimedes Wind Turbine Integrated with Solar Panels". *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 10(1), 161-175, 2025

PENDAHULUAN

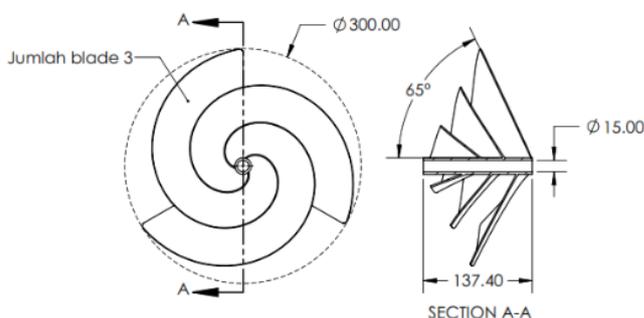
Energi adalah tantangan terbesar bagi negara berkembang dalam proses pembangunan berkelanjutan. Peningkatan populasi yang cepat memotivasi para peneliti untuk menemukan sumber energi baru sebagai pengganti bahan bakar fosil. Energi terbarukan merupakan salah satu energi yang paling bersih dan tersedia sesuai dengan sumber daya alam masing-masing negara[1]. Salah satu aspek kritis dalam pengembangan energi terbarukan adalah kemampuan untuk mengatasi variabilitas sumber daya alam itu sendiri. Energi surya sangat bergantung pada intensitas matahari, sedangkan energi angin juga memiliki fluktuasi yang signifikan. Dalam pembangkitan listrik melalui kombinasi energi angin dan matahari, peran masing-masing sumber energi bergantung pada musim. Energi matahari akan lebih dominan saat musim kemarau, sedangkan energi angin berkontribusi lebih besar dalam menghasilkan listrik pada musim penghujan[2,3]. Kedua sumber energi ini bertujuan untuk saling melengkapi dalam optimalisasi energi listrik yang dihasilkan[4]. Di sisi lain terdapat beberapa permasalahan yang terjadi pada turbin angin yaitu kegagalan material terutama pada turbin angin tipe *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT). Kegagalan ini dapat dipicu oleh berbagai faktor, seperti beban angin yang berlebihan, kelelahan material atau desain struktural yang kurang optimal dimana tidak hanya akan mengakibatkan kerugian finansial, tetapi juga dapat mengganggu pasokan listrik dan mengurangi kepercayaan publik pada energi terbarukan. Insiden yang menimbulkan kerugian dapat terjadi sebagai akibat dari kombinasi faktor-faktor tersebut[5]. Sedangkan turbin angin harus beroperasi dengan aman sehingga risiko dan bahaya harus diminimalkan agar turbin angin bekerja dengan tertib dan efisien. Permasalahan yang ditimbulkan oleh baling-baling, generator, struktur kerusakan dan gearbox muncul ke permukaan sebagai yang paling umum[6]. Akan tetapi dalam berbagai jurnal maupun artikel belum ditemukan kegagalan material pada turbin jenis ASWT baik secara simulasi FEA maupun secara aktual. Turbin angin tipe ASWT (*Archimedes Spiral Wind Turbine*) adalah tipe pilihan turbin angin yang menjanjikan, memberikan efisiensi yang lebih tinggi pada kecepatan angin rendah hingga kecepatan angin sedang, penyesuaian arah angin otomatis, dan pengurangan emisi kebisingan, hal ini didukung oleh desain bilah spiral yang inovatif[7]. Selain potensi penggunaan turbin angin ASWT dan pemanfaatan energi matahari melalui panel surya menjadi solusi yang cukup efektif dalam meningkatkan efisiensi pembangkitan listrik[8,9] Kombinasi turbin angin dan panel surya menyediakan sistem hibrida yang dapat mengoptimalkan produksi energi sepanjang tahun. Pada siang hari, panel surya berperan sebagai sumber utama listrik dengan memanfaatkan radiasi matahari, sementara pada malam hari atau saat intensitas cahaya matahari rendah, turbin angin dapat mengganti peran cahaya matahari. Sehingga, integrasi kedua teknologi

ini dapat mengatasi keterbatasan masing-masing sumber energi dan menghasilkan suplai listrik yang lebih stabil.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa sistem energi hibrida berbasis angin dan matahari mampu meningkatkan efisiensi konversi energi dibandingkan dengan penggunaan masing-masing sumber energi secara terpisah[10,11,12]. Faktor yang mendukung sistem hibrida ini lebih efisien adalah distribusi angin yang tidak selalu konstan sepanjang hari, di mana pada beberapa wilayah kecepatan angin cenderung meningkat pada malam hari[13] atau saat cuaca mendung[14]. Melalui kombinasi ini, pemanfaatan sumber daya alam menjadi lebih optimal tanpa bergantung pada satu jenis energi saja. Selain itu, pengembangan sistem hibrida ini juga dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mendukung upaya mitigasi perubahan iklim. Dalam perancangan sistem hibrida ini, pemilihan jenis turbin angin menjadi aspek yang penting. Turbin angin tipe ASWT memiliki beberapa keunggulan[15,16] yang menjadikannya lebih cocok untuk dikombinasikan dengan panel surya dibandingkan dengan turbin angin tipe HAWT. Desain bilah spiral ASWT dapat menangkap angin dari berbagai arah tanpa memerlukan mekanisme tambahan, sehingga lebih sederhana dalam instalasi dan pemeliharaan[17]. Selain itu, ASWT memiliki tingkat kebisingan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin angin tipe HAWT, sehingga lebih sesuai untuk diterapkan pada lingkungan perkotaan atau pemukiman[18]. Di sisi lain, panel surya yang akan dirancang dalam sistem ini harus memiliki efisiensi dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang bervariasi. Beberapa teknologi panel surya, seperti panel berbasis monokristalin atau teknologi perovskite menawarkan tingkat efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan panel surya konvensional[19,20,21]. Selain itu, desain pemasangan panel harus memperhitungkan integrasi dengan turbin angin agar tidak saling menghambat dalam menangkap energi. Sehingga melalui pendekatan ini, diharapkan mampu menghasilkan daya listrik yang maksimal dalam berbagai kondisi cuaca dan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi dalam mengembangkan sistem energi hibrida berbasis turbin angin ASWT dan panel surya. Hasil yang diperoleh nantinya diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan sistem energi terbarukan yang berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Desain Archimedes Spiral Wind Turbine (ASWT)



Gambar 1. Desain Tiga Bilah (3-Blade Design)

Dalam penelitian ini, kami menggunakan ASWT yang telah dikembangkan dalam penelitian sebelumnya. Penelitian tersebut telah melakukan simulasi menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis performa aerodinamis turbin. Namun, penelitian sebelumnya belum menganalisis kekuatan material dari struktur turbin, sehingga hal ini menjadi fokus utama dalam studi kami. Desain turbin ini dibuat menggunakan perangkat lunak

Computer-Aided Design (CAD) dengan parameter yang mengacu pada desain tiga bilah (3-blade design) sesuai dengan penelitian sebelumnya. Desain tiga bilah dipilih karena telah terbukti lebih efisien dibandingkan dengan desain empat bilah (4-blade design) dalam hal efisiensi konversi energi angin. Desain bilah turbin yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Gambar tersebut menunjukkan bentuk geometri bilah turbin yang mengikuti pola spiral Archimedes, yang dirancang untuk memaksimalkan penangkapan energi angin

Selain itu, parameter dimensi bilah turbin, seperti panjang, lebar, dan sudut kemiringan, dirinci secara lengkap pada Tabel 1. Tabel tersebut memberikan informasi teknis yang diperlukan untuk memastikan konsistensi dalam proses simulasi dan analisis lebih lanjut. Dengan mengikuti desain dan parameter yang telah teruji sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi dan mengembangkan lebih lanjut performa serta kekuatan material dari struktur turbin ASWT.

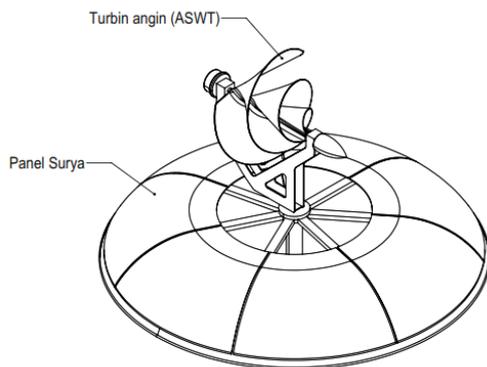
Tabel 1. *Parameter dimensi bilah turbin*

Part	Dimensi
OD blade	300 mm
Shaft	15 mm
Teba blade	1.5 mm
Jumlah blade	3 blade
Sudut kemiringan blade	65°
Panjang blade	137.4 mm

Material yang digunakan pada analisis penelitian ini adalah menggunakan aluminium alloy 6061 dengan *material properties* disajikan pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2. *Material properties* pada aluminium alloy 6061

No.	Property	AI 6061-T6
1	Young's modulus	68.9 Gpa
2	Poisson's ratio	0.33
3	Tensile yield strength	276 Mpa
4	Ultimate tensile strength	310 Mpa



Gambar 2. Turbin angin tipe ASWT dengan panel surya

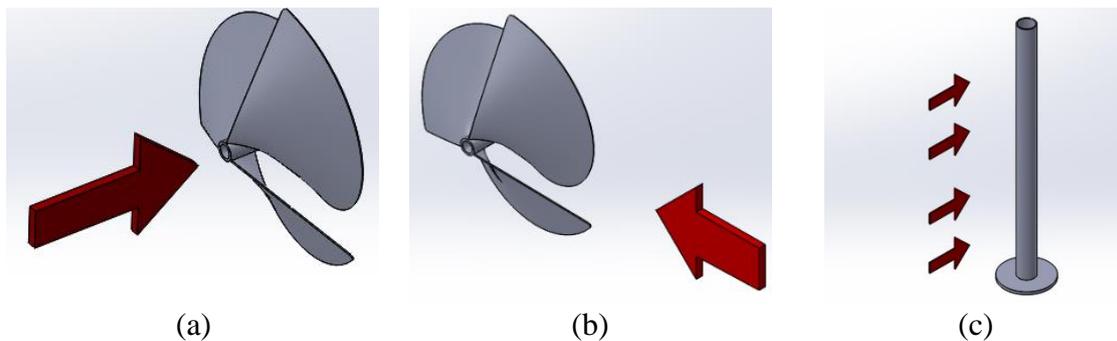
Dimensi Dari desain yang telah diperoleh berdasarkan penelitian sebelumnya, selain dilakukan analisis struktur untuk memastikan kekuatan dan stabilitasnya, juga dilakukan pengembangan lebih lanjut dengan mengintegrasikan turbin angin tipe ASWT dengan panel surya seperti Gambar 2. Desain panel surya yang berbentuk melingkar dirancang sedemikian rupa agar mampu menangkap cahaya matahari secara optimal, sehingga di setiap sudut, panel surya tetap dapat menerima sinar matahari dengan baik, bahkan saat posisi matahari berubah. Dengan demikian, sistem ini diharapkan dapat beroperasi secara efektif sepanjang hari, meningkatkan total output energi yang dihasilkan. Integrasi ini bertujuan untuk menciptakan sistem

energi terbarukan yang lebih efisien dengan memanfaatkan sinergi antara energi angin dan energi matahari. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat meningkatkan efisiensi konversi energi secara keseluruhan serta memberikan solusi yang lebih berkelanjutan dalam pemanfaatan sumber daya alam. Proses pengembangan ini tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis dan struktural, tetapi juga berfokus pada optimalisasi desain untuk mencapai kinerja maksimal dalam menghasilkan energi bersih.

Boundary Condition

Simulasi dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Ansys. Simulasi dibagi menjadi 2 bagian, yaitu simulasi statis dan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Pada analisis statis, diterapkan gaya yang dihasilkan oleh kekuatan angin. Proses analisis dibagi menjadi dua bagian utama: pertama, simulasi yang berfokus pada

turbin angin itu sendiri, dan kedua, simulasi yang mencakup struktur turbin beserta panel surya yang terintegrasi. Melalui pendekatan ini, kami dapat mengevaluasi kinerja dan respons struktural turbin angin terhadap beban angin yang bervariasi, serta menganalisis interaksi antara turbin dan panel surya dalam konteks kekuatan dan stabilitas keseluruhan sistem. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan dua sisi, yaitu sisi depan dan samping. Pendekatan ini dimaksudkan untuk mengantisipasi arah angin yang tidak menentu, yang dapat datang dari berbagai arah. Selain itu, analisis juga dilakukan pada penyangga untuk mengevaluasi kekuatannya dalam menahan kecepatan angin yang ditentukan, seperti yang terlihat pada Gambar 3. Kecepatan angin yang digunakan dalam simulasi ditetapkan berdasarkan data sebelumnya, yaitu 50-100 m/s. Pada kecepatan ini, diperkirakan turbin angin dapat mengalami kerusakan atau kegagalan material.



Gambar 3. (a) *Boundary condition* arah angin depan, (b) *Boundary condition* arah angin samping, (c) *Boundary condition* arah angin struktur penyangga

Dalam penelitian ini, simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) juga dilakukan untuk mengetahui apakah turbin mampu beroperasi dengan baik atau tidak. *Boundary condition* yang digunakan dalam penelitian ini dirancang untuk mensimulasikan kondisi operasional turbin angin secara realistis. Pada bagian *inlet*, diterapkan kecepatan aliran angin sebesar 7 m/s sebagai representasi kecepatan angin rata-rata yang umum dijumpai dalam aplikasi turbin skala kecil. Sementara itu, *pressure outlet* diatur pada tekanan 0 Pa *gauge*, yang ekuivalen dengan tekanan atmosfer (1 atm atau 101325 Pa absolut), untuk merepresentasikan kondisi lingkungan terbuka di sekitar turbin.

Pada permukaan turbin (*rotating domain*), diterapkan kondisi *moving wall* dengan tipe *rotational* untuk mensimulasikan putaran bilah turbin, serta kondisi *no-slip* yang mengasumsikan tidak adanya slip antara fluida (udara) dan permukaan bilah. Adapun dinding selubung *stationary domain* juga diatur dengan kondisi *no-slip* untuk memastikan simulasi aliran udara di sekitar turbin berlangsung akurat tanpa gangguan gesekan yang tidak realistis. Dengan menggabungkan pendekatan simulasi statis dan CFD, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang komprehensif mengenai desain dan ketahanan turbin angin serta integrasinya dengan panel surya dalam menghadapi kondisi lingkungan yang ekstrem.

Grid Independence Test (GIT)

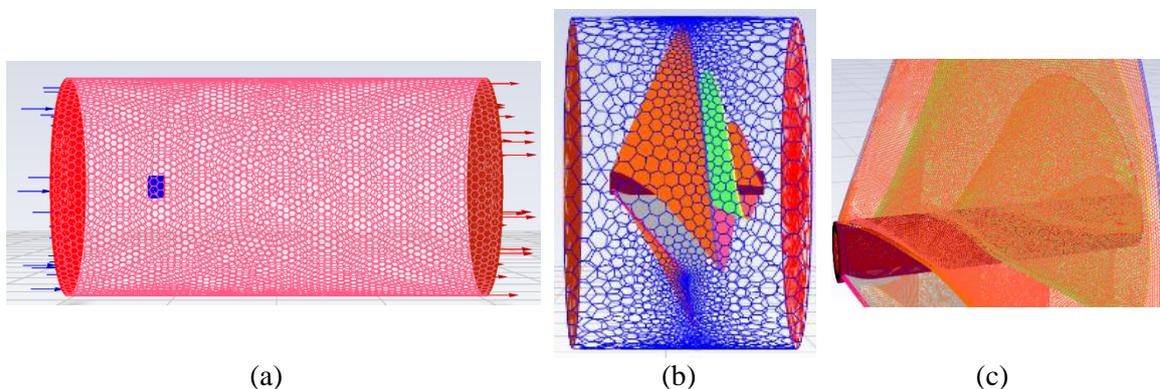
Proses validasi *grid independence test* dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dari setiap mesh. Perbandingan ini sering divisualisasikan dalam bentuk grafik, di mana hasil simulasi diplot terhadap ukuran mesh atau jumlah elemen. Jika grafik menunjukkan tren yang mendatar (konvergen), artinya hasil simulasi sudah stabil dan tidak lagi berubah signifikan meskipun mesh diperhalus. Selain itu, nilai *error* atau deviasi antara hasil simulasi pada mesh yang berbeda dihitung untuk menentukan tingkat akurasi. Dalam

penelitian ini, mesh yang dipilih adalah tiga hasil simulasi tegangan (*stress*) yang memiliki nilai perbedaan (*deviasi*) kurang dari 1% jika dibandingkan dengan nilai mesh sebelumnya. Deviasi antar mesh dihitung menggunakan Rumus (1) sebagai berikut:

$$Error = \left| \frac{\text{Nilai mesh halus} - \text{Nilai mesh kasar}}{\text{Nilai mesh halus}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

Persamaan (1) digunakan untuk mengevaluasi stabilitas hasil simulasi terhadap perubahan ukuran mesh. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *error* antar mesh berada di bawah ambang batas 1%, yang menandakan bahwa hasil simulasi telah mencapai konvergensi. Oleh karena itu, ukuran grid tersebut dapat dianggap independen dan layak digunakan untuk analisis lebih lanjut. Pemilihan mesh yang tepat ini tidak hanya memastikan akurasi hasil simulasi tetapi juga efisiensi dalam penggunaan sumber daya komputasi. Proses ini menjamin bahwa simulasi numerik dapat diandalkan secara ilmiah tanpa menghabiskan waktu dan energi komputasi yang tidak diperlukan.

Sedangkan pada analisa CFD, proses *meshing* berfungsi membagi model geometri menjadi beberapa elemen kecil untuk memudahkan proses komputasi. Pada penelitian ini, jenis *meshing* yang digunakan berupa *poly-hexcore*. Hasil *meshing* dapat dikatakan baik karena memiliki *skewness maximum* sebesar 0,46 dan *orthogonal quality minimum* sebesar 0,204. Hasil *meshing* dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. (a) Hasil *meshing* pada *stationary domain*, (b) Hasil *meshing* pada *rotating domain*, (c) Hasil *meshing* pada *turbin angin*

HASIL DAN PEMBAHASAN

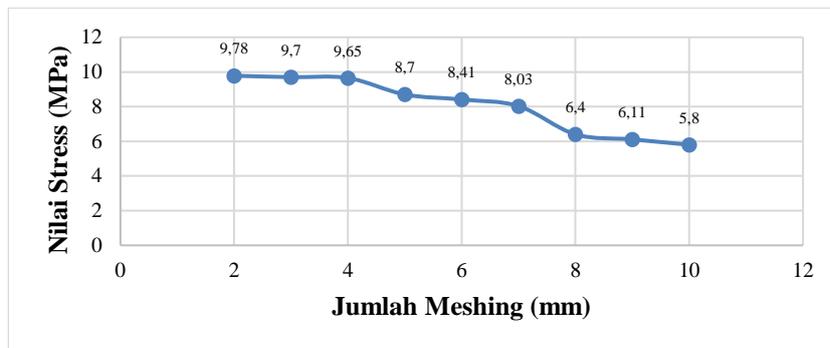
Hasil *Grid Independence Test (GIT)*

Dalam studi ini, mesh yang terpilih didasarkan pada tiga hasil simulasi tegangan (*stress*) dengan nilai deviasi di bawah 1% ketika dibandingkan dengan mesh sebelumnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa hasil simulasi telah mencapai tahap konvergensi, sehingga ukuran grid yang digunakan dapat dinyatakan independen dan memenuhi syarat untuk digunakan dalam analisis lebih mendalam. Hasil konvergensi dan nilai eror dari penelitian ini dapat dilihat dari Tabel 3. Dari tabel hasil konvergensi dan nilai *error* yang diperoleh, dapat dilihat bahwa data tersebut bersumber dari grafik yang ditampilkan pada Gambar 5. Melalui grafik tersebut, terlihat bahwa kurva yang paling datar menunjukkan nilai *error* terkecil.

Hal ini mengindikasikan bahwa mesh yang digunakan telah mencapai tingkat konvergensi yang memadai. Dengan demikian, mesh tersebut dapat dinyatakan valid karena hasil simulasi yang dihasilkan tidak lagi mengalami perubahan signifikan meskipun ukuran grid diperhalus lebih lanjut. Proses ini memperkuat kesimpulan bahwa pemilihan mesh yang tepat telah dilakukan, sehingga hasil simulasi dapat diandalkan untuk analisis lebih lanjut.

Tabel 3. Hasil konvergensi dan nilai *error*

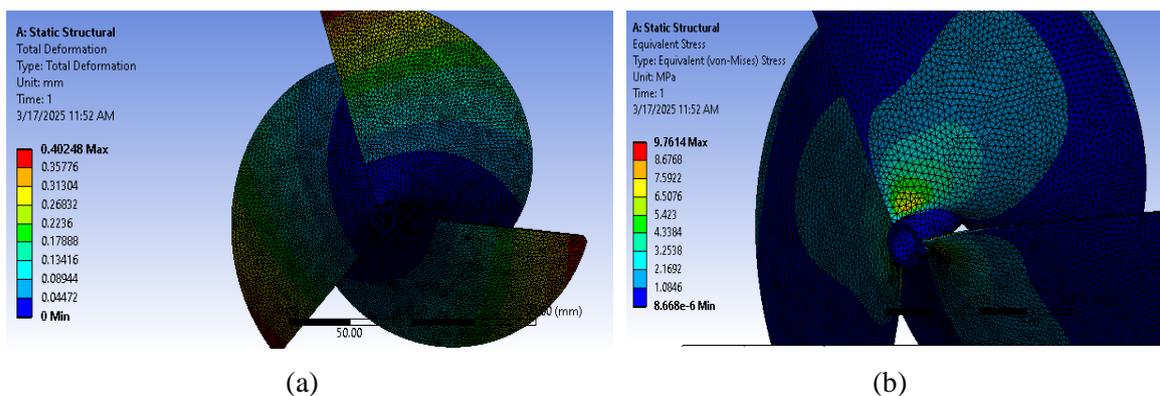
Meshing (mm)	Nilai Stress (MPa)	Nilai eror
10	5.80	
9	6.11	5.07 %
8	6.40	4.53 %
7	8.40	23.81%
6	8.57	1.18 %
5	8.70	2.30 %
4	9.50	8.42 %
3	9.70	2.06 %
2	9.78	0.78 %



Gambar 4. Hasil konvergensi dan nilai *error*

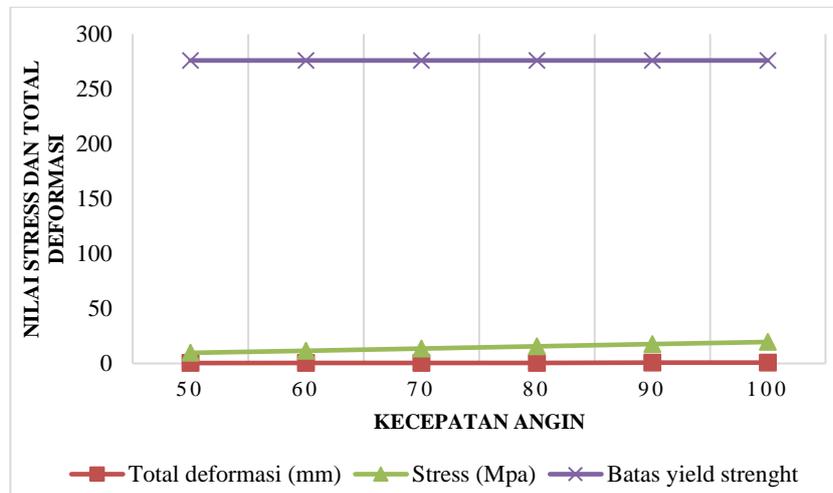
Hasil Simulasi Statis pada Blade

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 6, visualisasi dibagi menjadi dua bagian, yaitu Gambar 6 (a) yang menampilkan distribusi total deformasi dan Gambar 6 (b) yang menunjukkan distribusi tegangan maksimum pada bilah turbin ketika menerima beban dari arah depan. Gambar 6 (a) memperlihatkan area dengan warna terang yang mengindikasikan lokasi deformasi terbesar, sedangkan Gambar 6 (b) memperlihatkan konsentrasi tegangan tertinggi pada area berwarna intens, *boundary condition* yang diterapkan mengasumsikan bahwa bilah turbin menerima beban dari arah depan. Hasil simulasi visual menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada bagian pangkal bilah, sedangkan deformasi maksimum terletak pada ujung terluar bilah. Nilai maksimum tegangan mencapai 19,8 MPa dan deformasi mencapai 0,80 mm, yang keduanya masih jauh di bawah batas tegangan ijin material (*yield strength*) aluminium 6061 sebesar 276 MPa. Ini mengindikasikan bahwa secara struktural, bilah turbin masih berada dalam zona aman.



Gambar 5. (a) Hasil simulasi pertama total deformasi, (b) Nilai stress maksimum

Untuk memberikan pemahaman yang lebih kuantitatif terhadap tren perubahan nilai-nilai tersebut, grafik hubungan antara kecepatan angin, total deformasi, dan tegangan maksimum disajikan pada Gambar 7. Terlihat bahwa baik *stress* maupun deformasi meningkat secara bertahap seiring dengan peningkatan kecepatan angin dari 50 hingga 100 m/s. Namun demikian, nilai *stress* tetap berada jauh di bawah batas *yield strength* yang ditunjukkan oleh garis *horizontal* kuning, menandakan margin keamanan yang tinggi. Temuan ini sejalan dengan studi[5], yang menyatakan bahwa struktur turbin angin umumnya mengalami kegagalan saat tegangan mendekati 80% dari batas luluh material. Dalam simulasi ini, tegangan maksimum hanya sekitar 7% dari batas tersebut, yang menunjukkan desain struktur masih sangat aman terhadap potensi kerusakan akibat beban angin ekstrem.

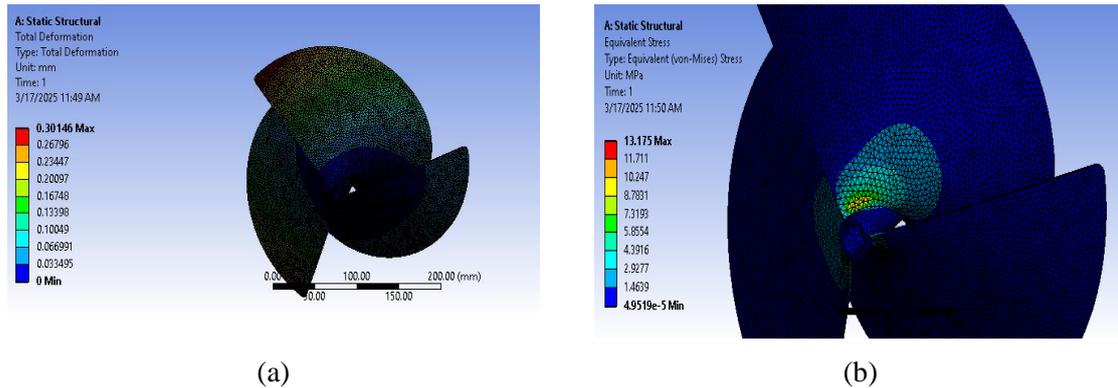


Gambar 7. Hubungan kecepatan angin terhadap total deformasi dan tegangan bilah turbin (arah depan)

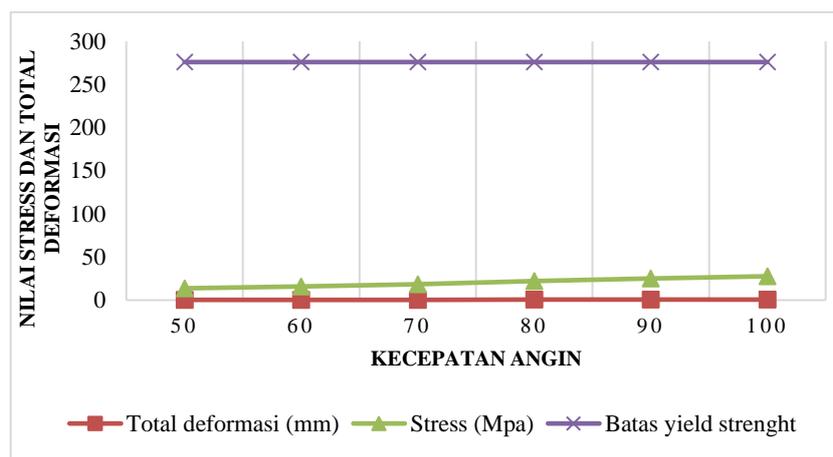
Hasil simulasi kedua yang ditunjukkan pada Gambar 8 memperlihatkan distribusi tegangan dan deformasi saat bilah turbin menerima beban dari arah samping (*lateral*). Hasil simulasi kedua yang ditunjukkan pada Gambar 8 terdiri dari dua visualisasi, yaitu Gambar 8(a) yang menampilkan distribusi total deformasi dan Gambar 8(b) yang menunjukkan distribusi tegangan maksimum pada bilah turbin saat menerima beban dari arah samping. Gambar 8(a) menunjukkan area dengan warna terang yang mengindikasikan lokasi deformasi paling signifikan, sementara Gambar 8(b) menunjukkan area konsentrasi tegangan tertinggi melalui intensitas warna yang lebih pekat. Visualisasi simulasi menunjukkan bahwa tegangan maksimum sebesar 27,67 MPa terjadi pada pangkal bilah, sementara deformasi maksimum sebesar 0,60 mm terjadi pada ujung terluar bilah. Nilai tegangan tersebut masih sangat jauh di bawah batas tegangan ijin material aluminium 6061, yaitu 276 MPa, sehingga struktur tetap berada dalam batas aman dari risiko kegagalan material. Untuk mendukung pemahaman kuantitatif terhadap tren perubahan, Gambar 9 menampilkan grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap nilai *stress* dan deformasi. Terlihat bahwa kenaikan kecepatan angin dari 50 hingga 100 m/s secara konsisten meningkatkan nilai tegangan dan deformasi. Namun demikian, seluruh nilai *stress* masih berada jauh di bawah batas *yield strength* (ditunjukkan dengan garis *horizontal* kuning), menunjukkan bahwa struktur memiliki margin keamanan tinggi bahkan saat menerima beban *lateral*.

Walaupun deformasi masih dalam ambang batas elastis, arah beban samping menimbulkan respons struktural yang berbeda dari beban *frontal*, terutama dalam bentuk lengkungan *lateral*. Hal ini berpotensi memengaruhi kestabilan aerodinamis bilah jika terjadi fluktuasi beban dalam durasi panjang. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi lebih lanjut

terhadap konsentrasi tegangan lokal yang mungkin mempercepat kelelahan material. Temuan ini mendukung pentingnya simulasi multi-arah sebagai pendekatan desain berbasis beban riil.

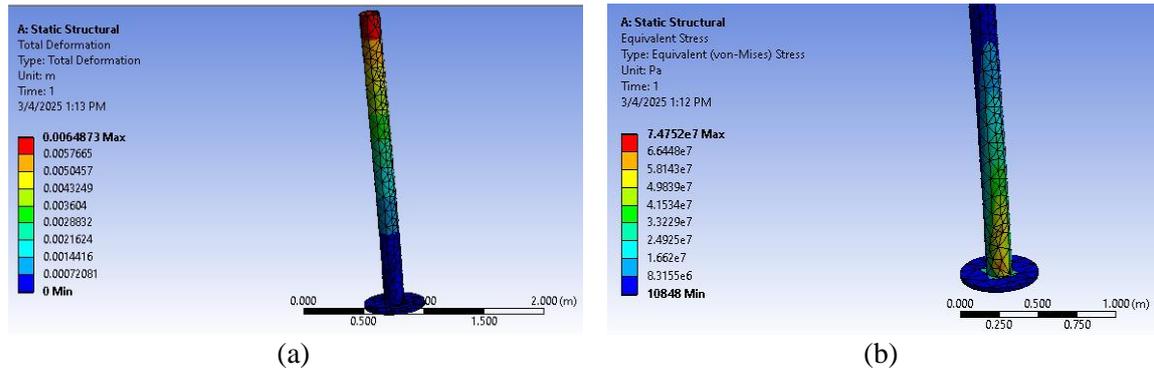


Gambar 8. (a) Hasil Simulasi Kedua Total Deformasi (b) Nilai *Stress* Maksimum



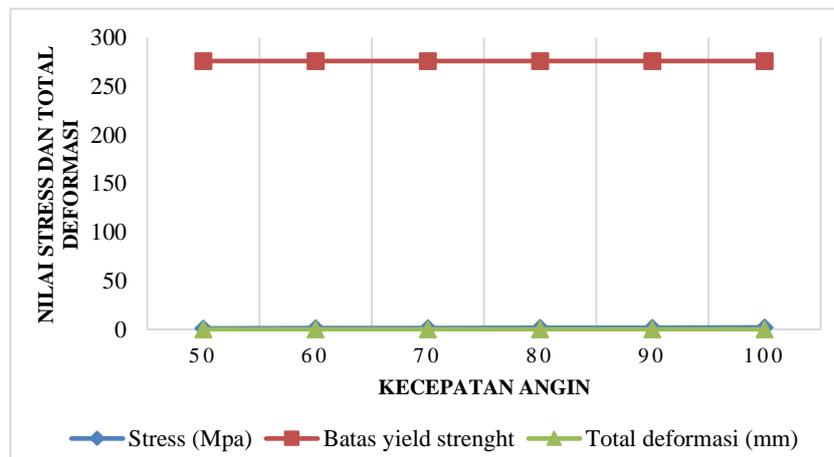
Gambar 9. Hubungan kecepatan angin terhadap total deformasi dan tegangan bilah (arah samping)

Hasil simulasi ketiga yang ditunjukkan pada Gambar 10, Gambar 10 terdiri dari Gambar 10(a) yang menunjukkan distribusi total deformasi dan Gambar 10(b) yang menunjukkan distribusi tegangan maksimum pada tiang penyangga akibat beban angin dari arah depan. Pada Gambar 10 menunjukkan analisis struktur struktur penyangga dengan asumsi menerima beban dari arah depan. Visualisasi distribusi tegangan dan deformasi menunjukkan bahwa tegangan maksimum sebesar 2,6 MPa terjadi di bagian pangkal tiang, sementara deformasi maksimum sebesar $1,2 \times 10^{-2}$ meter terjadi pada ujung atas tiang. Nilai ini berada jauh di bawah batas tegangan ijin material aluminium 6061 sebesar 276 MPa, yang menandakan bahwa struktur penyangga memiliki kekuatan yang sangat memadai untuk menahan beban ekstrem. Guna mendukung pemahaman terhadap pola distribusi nilai simulasi, Gambar 11 menyajikan grafik hubungan antara kecepatan angin terhadap nilai tegangan dan deformasi. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa baik tegangan maupun deformasi meningkat secara proporsional terhadap kecepatan angin. Namun, nilai *stress* tetap sangat rendah dibandingkan dengan batas *yield strength* (ditandai dengan garis horizontal oranye), dengan nilai tertinggi hanya sekitar 1% dari batas tersebut. Ini menunjukkan bahwa tiang penyangga memiliki margin keamanan struktural yang sangat besar.



Gambar 10. Hasil simulasi ketiga (a) Total deformasi (b) Nilai *stress* maksimum

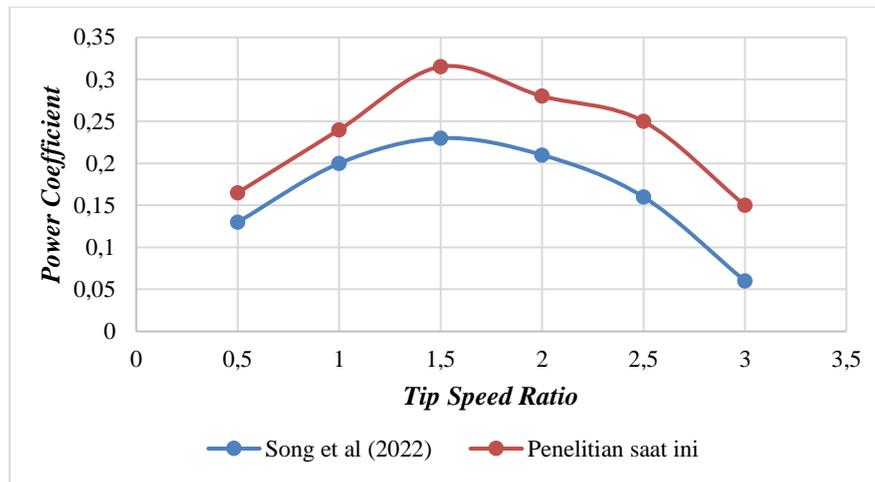
Kelebihan kapasitas ini membuka peluang untuk optimasi desain di masa depan, seperti pengurangan massa atau penggunaan material alternatif yang lebih ringan namun tetap aman. Temuan ini juga memperkuat hasil dari simulasi sebelumnya bahwa seluruh komponen struktur ASWT memiliki performa mekanis yang andal dalam menghadapi beban angin dari berbagai arah.



Gambar 11. Hubungan kecepatan angin terhadap total deformasi dan tegangan struktur penyangga

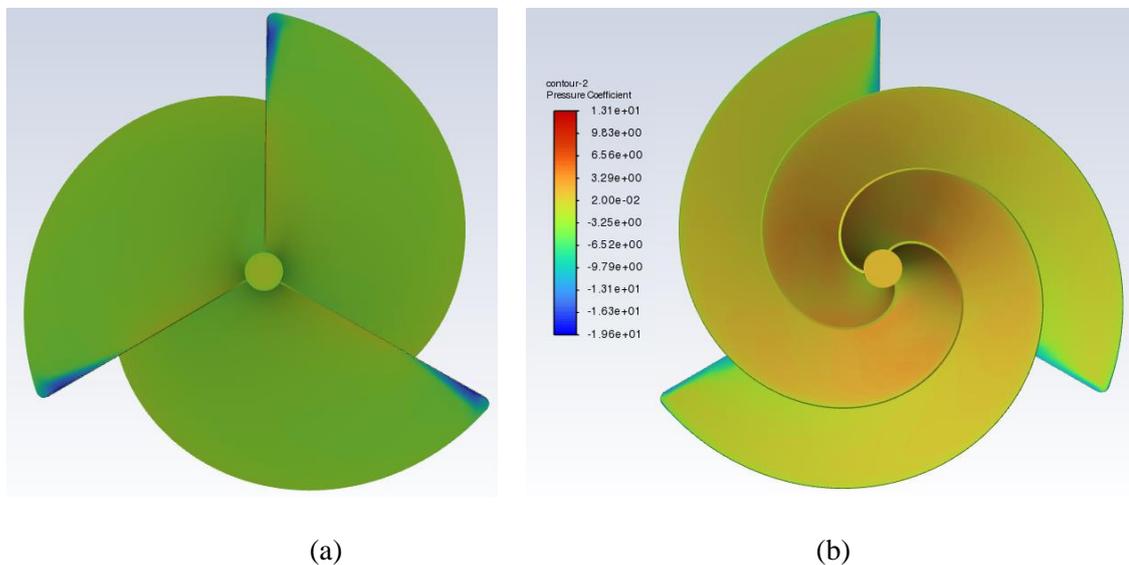
Hasil Simulasi Statis pada Bilah

Analisis hasil simulasi CFD mengungkapkan karakteristik performa turbin angin melalui variasi TSR dari 0,5 hingga 3. Hal itu disebabkan turbin jenis *Archimedes Spiral Wind Turbine* mampu bekerja pada kecepatan aliran angin yang rendah dan TSR yang rendah[18]. Gambar 12 menunjukkan kurva nilai *power coefficient* terhadap TSR. Penelitian yang dilakukan oleh[18] memiliki sudut bilah yang terbentuk mulai dari *blade* terkecil hingga terbesar yaitu 30°-45°- 60°, sedangkan penelitian yang dilakukan saat ini memiliki sudut bilah yang terbentuk mulai dari *blade* terkecil hingga terbesar yaitu sebesar 20°- 50°- 65°. *Power coefficient* yang dihasilkan pada penelitian ini memiliki nilai yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh[18]. Hal ini disebabkan oleh penelitian saat ini memiliki sudut bilah depan yang lebih kecil dan sudut bilah belakang yang lebih besar bila dibandingkan dengan milik[18]. Adanya sudut bilah yang lebih kecil tersebut mampu mendistribusikan aliran dengan mudah menuju bilah tanpa ada gangguan yang berarti akibat efek *blockage* akibat besarnya sudut bilah[18]. Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin besar kecepatan putaran turbin, akan mengakibatkan meningkatnya efek *blockage* yang dibentuk oleh turbin yang menyebabkan penurunan *power coefficient*.



Gambar 12. Kurva power coefficient terhadap TSR

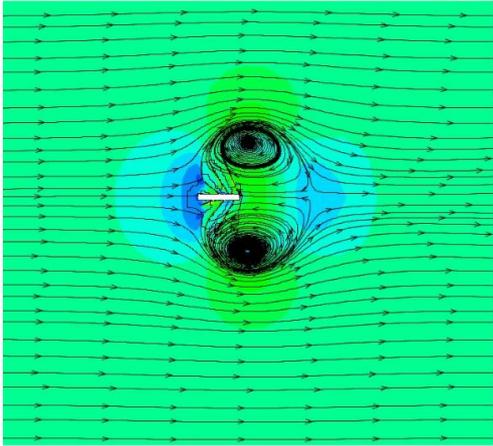
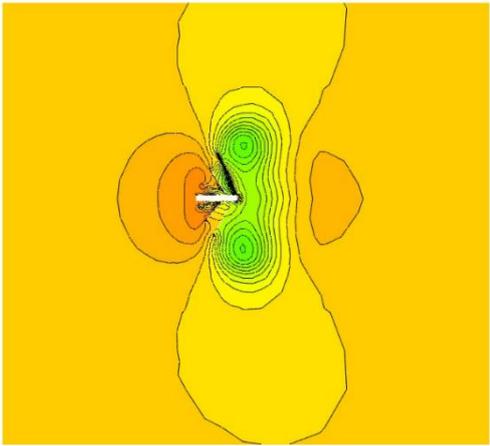
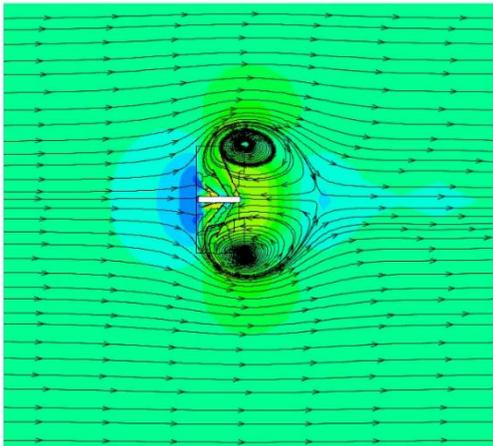
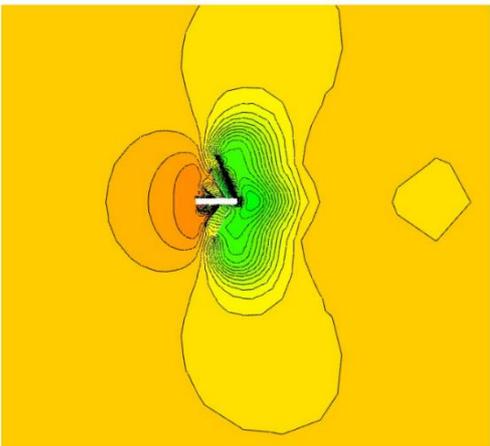
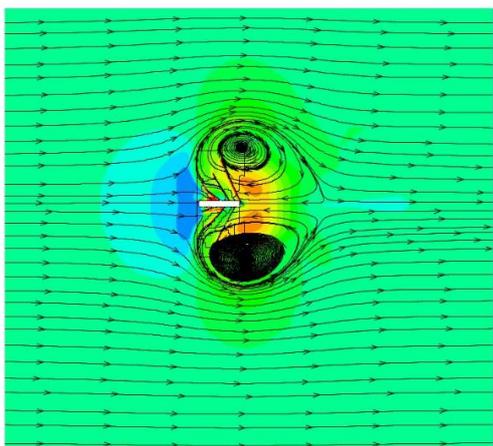
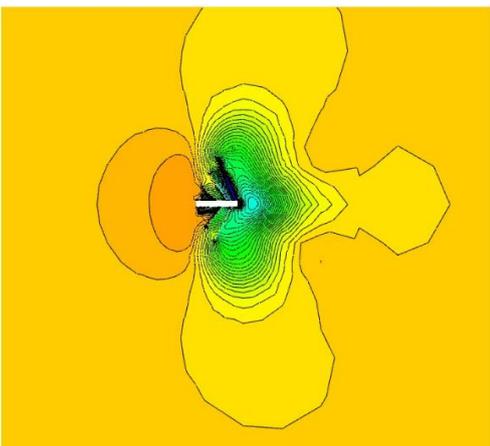
Gambar 13 memperlihatkan kontur koefisien tekanan pada TSR sebesar 1,5. Pada Gambar 13 tersebut terdapat Gambar 13 (a) baling baling dari arah depan dan Gambar 13 (b) adalah blade dari arah belakang. Aliran angin yang melewati ujung *blade* akan membentuk daerah dengan tekanan yang rendah dan menghasilkan kecepatan yang lebih tinggi pada bagian tersebut. Daerah bertekanan rendah terbentuk pada bagian sisi hisap dan daerah bertekanan tinggi terbentuk di sisi tekan.



Gambar 13. kontur koefisien tekanan pada TSR sebesar 1,5 (a) bagian depan (b) bagian belakang

Tabel 5 menyajikan hasil simulasi kontur kecepatan dan tekanan di sekitar turbin pada tiga nilai Tip Speed Ratio (TSR), yaitu: (a) TSR = 0,5, (b) TSR = 1,5, dan (c) TSR = 3. Gambar (a) menunjukkan aliran udara yang masih stabil dengan *wake* sempit dan terfokus di belakang turbin. Gambar (b) menunjukkan *wake* yang mulai melebar, serta zona tekanan rendah yang meluas di sekitar rotor akibat peningkatan kecepatan putar. Sementara itu, pada Gambar (c), *wake* menjadi lebih besar dan asimetris, dengan distribusi tekanan rendah yang signifikan karena efek *blockage*. Perbedaan ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai TSR, pola aliran menjadi lebih turbulen dan kompleks, yang dapat mengurangi efisiensi aerodinamis turbin.

Tabel 5 Kontur kecepatan dan tekanan

TSR	Kontur Kecepatan	Kontur Tekanan
0.5 (a)		
1.5 (b)		
3 (c)		

Pembahasan

Berdasarkan hasil simulasi statis, struktur turbin angin tipe ASWT menunjukkan integritas struktural yang sangat baik terhadap berbagai arah pembebanan. Simulasi bilah turbin dengan beban dari arah depan menunjukkan tegangan maksimum 19,8 MPa dan deformasi maksimum 0,80 mm, sedangkan untuk arah samping, tegangan maksimum meningkat menjadi 27,67 MPa dan deformasi menurun menjadi 0,60 mm. Meskipun terjadi variasi pada nilai-nilai tersebut, seluruh tegangan tetap berada jauh di bawah batas ijin

material sebesar 276 MPa, dengan margin keamanan lebih dari 90%. Ini mengindikasikan bahwa struktur bilah memiliki ketahanan yang tinggi terhadap pembebanan angin ekstrem dan tidak menunjukkan indikasi risiko kegagalan dalam kondisi simulasi.

Hasil simulasi pada tiang penyangga juga menunjukkan kinerja yang sangat baik, dengan tegangan maksimum hanya sebesar 2,6 MPa dan deformasi maksimum $1,2 \times 10^{-2}$ m. Nilai ini hanya sekitar 1% dari batas tegangan ijin, yang berarti bahwa desain struktur tiang sangat konservatif. Meskipun ini menunjukkan keamanan struktural tinggi, temuan ini juga membuka peluang optimasi lanjutan, seperti pengurangan massa struktur atau penggunaan material yang lebih ringan, untuk meningkatkan efisiensi biaya dan distribusi beban dalam sistem.

Pada sisi performa aerodinamika, simulasi CFD menunjukkan bahwa turbin menghasilkan performa optimal pada TSR 1-2, yang ditandai dengan nilai maksimum dari moment coefficient dan power coefficient. Setelah titik tersebut, terjadi penurunan performa yang cukup signifikan. Penurunan ini disebabkan oleh efek *blockage* dan peningkatan turbulensi aliran udara di sekitar bilah turbin, yang mengakibatkan energi angin tidak terserap dengan baik. Hal ini terlihat jelas pada kontur kecepatan dan tekanan yang menunjukkan pembentukan *wake* dan *vortex* lebih besar pada TSR tinggi.

Efek aerodinamis negatif pada TSR tinggi menunjukkan bahwa meskipun struktur turbin kuat secara mekanik, efisiensinya dalam menangkap energi berkurang pada kecepatan rotasi tinggi. Oleh karena itu, desain geometri bilah perlu dioptimalkan lebih lanjut, baik dari segi sudut serang maupun profil bilah, untuk mengurangi rugi-rugi aerodinamis tersebut. Selain itu, pengaturan TSR melalui kontrol kecepatan atau sistem pitch control juga dapat menjadi pendekatan untuk menjaga performa tetap optimal dalam berbagai kondisi angin. Hasil ini mendukung literatur sebelumnya seperti yang disampaikan oleh [7,18] yang menekankan pentingnya keseimbangan antara desain struktural dan performa aerodinamis untuk mencapai efisiensi tinggi pada sistem turbin tipe ASWT. Secara keseluruhan, baik dari sisi kekuatan mekanik maupun efisiensi kerja, sistem ASWT terintegrasi panel surya dalam penelitian ini menunjukkan potensi yang kuat untuk diterapkan sebagai bagian dari sistem energi hibrida yang berkelanjutan dan adaptif terhadap kondisi lingkungan yang dinamis.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa desain turbin angin tipe *Archimedes Screw Wind Turbine* (ASWT) yang terintegrasi dengan panel surya memiliki performa yang sangat baik, baik dari sisi kekuatan struktural maupun efisiensi aerodinamis. Simulasi statis menunjukkan bahwa tegangan maksimum akibat beban angin dari berbagai arah (*frontal* dan *lateral*) serta beban pada tiang penyangga seluruhnya masih berada jauh di bawah batas tegangan luluh material aluminium 6061-T6 sebesar 276 MPa. Hal ini membuktikan bahwa desain struktur memiliki faktor keamanan yang tinggi dan mampu bertahan terhadap beban angin ekstrem hingga 100 m/s.

Sementara itu, hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa turbin memiliki efisiensi optimal pada TSR 1-2, yang ditandai dengan nilai maksimum dari *moment coefficient* dan *power coefficient*. Penurunan performa pada TSR tinggi disebabkan oleh efek *blockage* dan terbentuknya *wake vortex* di belakang bilah turbin, yang mengurangi kemampuan penangkapan energi dari aliran udara.

Secara keseluruhan, sistem ASWT-panel surya ini tidak hanya layak secara struktural, tetapi juga efisien secara operasional. Namun demikian, diperlukan optimasi lanjutan pada geometri bilah dan pengaturan TSR melalui sistem kontrol kecepatan atau desain bilah adaptif agar performa tetap optimal pada berbagai kondisi angin. Penelitian ini memberikan

dasar yang kuat bagi pengembangan sistem energi terbarukan hibrida yang lebih handal, efisien, dan adaptif di masa depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada tim peneliti Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika Jurusan Teknik Politeknik Negeri Jember yang telah memberikan dukungan penuh pada penelitian ini

REFERENSI

- [1] M. A. A. Nawar, H. S. A. Hameed, A. Ramadan, Y. A. Attai, and M. H. Mohamed, "Experimental and Numerical Investigations of the Blade Design Effect on Archimedes Spiral Wind Turbine Performance," *Energy*, vol. 223, May 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120051.
- [2] Dwi Risdianto, Nurry Widya Hesty, Toha Zaky, Rudi Purwo Wijayanto, Agustina Putri Mayasari, and Ario Witjakso, "Pemilihan Turbin Angin Skala Kecil Berdasarkan Analisis Potensi Energi Angin Menggunakan Windographer," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 13, no. 4, pp. 290–296, Nov. 2024, doi: 10.22146/jnteti.v13i4.8753.
- [3] S. Risdiara and C. Rangkuti, "Pengujian Sistem Penerangan Jalan Umum Dengan Menggunakan Sumber Daya Listrik Kombinasi Dari Solar Panel Dan Turbin Savonius," 2018.
- [4] Z. Tharo, "Kombinasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dan Angin Untuk Mewujudkan Energi Murah Dan Ramah Lingkungan," vol. 12, no. 2, 2019.
- [5] J. S. Chou, Y. C. Ou, K. Y. Lin, and Z. J. Wang, "Structural failure simulation of onshore wind turbines impacted by strong winds," *Eng Struct*, vol. 162, pp. 257–269, May 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.02.006.
- [6] M. Kavakli and O. T. Gudmestad, "Analysis and Assessment of Onshore and Offshore Wind Turbines Failures," *International Journal of Energy Production and Management*, vol. 8, no. 1, pp. 27–34, Mar. 2023, doi: 10.18280/ijepm.080104.
- [7] A. E. Faisal *et al.*, "Investigating the techniques used for improving the aerodynamic performance of Archimedes spiral wind turbines: A comprehensive review and future work avenues," Mar. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rineng.2025.103992.
- [8] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, and K. H. Kim, "Solar energy: Potential and future prospects," 2018, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2017.09.094.
- [9] R. Parthiban and P. Ponnambalam, "An Enhancement of the Solar Panel Efficiency: A Comprehensive Review," Jul. 14, 2022, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fenrg.2022.937155.
- [10] Q. Hassan, S. Algburi, A. Z. Sameen, H. M. Salman, and M. Jaszczur, "A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications," Dec. 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rineng.2023.101621.
- [11] R. Al Badwawi, M. Abusara, and T. Mallick, "A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System," *Smart Science*, vol. 3, no. 3, pp. 127–138, 2015, doi: 10.1080/23080477.2015.11665647.
- [12] N. Jha *et al.*, "Energy-Efficient Hybrid Power System Model Based on Solar and Wind Energy for Integrated Grids," *Math Probl Eng*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/4877422.
- [13] A. Ragil Kusuma, P. Fisika, and F. Keguruan dan, "Studi Literatur: Mekanisme Angin Darat Dan Laut Serta Dampaknya Oleh Nelayan," *Jurnal Fisika dan Pembelajarannya (PHYDAGOGIC)*, vol. 7, no. 1, pp. 2024–2654, doi: 10.31605/phy.v7i1.3831.

- [14] N. Zaqiyah, “Sistem Angin Hybrid Dengan Sumber Energi Terbarukan Lainnya Sebagai Energi Yang Ramah Lingkungan,” 2024.
- [15] J. Rohmer, D. Knittel, G. Sturtzer, D. Flieller, and J. Renaud, “Modeling and experimental results of an Archimedes screw turbine,” *Renew Energy*, vol. 94, pp. 136–146, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.03.044.
- [16] E. Hertnacahyani Herraprastanti, M. Rifa, H. Suryanto Sekolah Tinggi Teknologi Ronggolawe Cepu, J. B. Kampus Ronggolawe Blok No, and M. Cepu, “Perancangan dan Pembuatan Prototype Turbin Angin Archimedes,” *JME (Jurnal Mekanika dan Energi)*, vol. 3, no. 1, 2023.
- [17] A. D. Korawan and R. Febritasari, “Experimental investigations of number of blades effect on archimedes spiral wind turbine performance,” *Mechanical Engineering for Society and Industry*, vol. 4, no. 2, pp. 198–209, Nov. 2024, doi: 10.31603/mesi.12373.
- [18] K. Song, H. Huan, and Y. Kang, “Aerodynamic Performance and Wake Characteristics Analysis of Archimedes Spiral Wind Turbine Rotors with Different Blade Angle,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16010385.
- [19] M. Asdhiyoga Rahmanta *et al.*, “Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV) Untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia,” *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, vol. 7, no. 1, 2023.
- [20] D. Lusiana, A. Brahma Nugroho, and B. S. Rintyarna, “Jurnal Sistem dan Teknologi Informasi Rancang Bangun Prototype Solar Tracker untuk Optimalisasi Pengisian Battery pada Solar Home System,” vol. 6, no. 2, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/JUSTINDO>
- [21] J. P. Manurung and M. S. Boedoyo, “Life Cycle Assessment pada Solar Photovoltaics: Review,” *Jurnal Penelitian Sains Teknologi*, vol. 13, no. 1, pp. 20–27, 2022, [Online]. Available: <http://journals2.ums.ac.id/index.php/saintek>