

Simulasi Respon Material PLA Berstruktur Sandwich pada Turbin Angin Helix Savonius Airfoil Shape Blade

**Fikan Mubarak Rohimsyah*, Muhammad Irvan Ramadhani, Chaerul Qalbi,
Ade Wahyu Yusariarta**

Institut Teknologi Kalimantan, Indonesia

Email: adewahyu27@lecturer.itk.ac.id*

Kata Kunci	Abstrak
Bentuk airfoil bilah turbin angin helix savonius; ketebalan bilah; Struktur Sandwich; PLA (Asam Polilaktat); Metode Elemen Hingga (FEM); Kekuatan Lentur.	Dalam meningkatkan kekuatan struktural turbin angin Savonius, optimasi desain bilah dan pemilihan material menjadi faktor penting terutama untuk operasi pada kecepatan angin rendah. Turbin helix Savonius diketahui memiliki performa lebih baik dibandingkan model konvensional karena desain spiralnya yang menstabilkan torsi, sementara penggunaan airfoil shape blade mampu meningkatkan torsi hingga 10% dibanding tipe U tradisional. Pada penelitian ini, material PLA dipilih karena ringan dan ramah lingkungan, meskipun memiliki kelemahan berupa titik leleh rendah dan sifat rapuh. Untuk meningkatkan performa mekanisnya, digunakan dua variasi struktur, yaitu struktur solid sebagai kontrol dan struktur sandwich re-entrant sebagai struktur inti. Pengujian three-point bending menunjukkan bahwa struktur solid memiliki flexural strength tertinggi sebesar 55 MPa, sedangkan struktur re-entrant memiliki nilai 48,11 MPa. Namun hasil simulasi statis menggunakan Finite Element Method (FEM) memperlihatkan bahwa struktur re-entrant mampu mendistribusikan tegangan Von Mises lebih merata sehingga menurunkan konsentrasi stress pada area kritis blade. Sebaliknya, struktur solid menunjukkan total deformation paling kecil pada pembebanan 0,049 N untuk blade dan 0,1225 N untuk rangkaian turbin, yang menandakan kekakuan struktural lebih tinggi. Hasil simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) pada kecepatan angin 2 m/s menunjukkan bahwa struktur re-entrant menghasilkan pola aliran yang lebih stabil. Secara keseluruhan, struktur solid unggul dalam kekakuan dan flexural strength, sedangkan struktur re-entrant lebih baik dalam distribusi tegangan dan respons aerodinamik.
Keywords	Abstract
<i>Helix savonius wind turbine blade airfoil shape; Blade Thickness; Sandwich Structure; PLA (Polylactic Acid); Finite Element Method (FEM); Flexural Strength.</i>	<i>In improving the structural strength of the Savonius wind turbine, the optimization of blade design and material selection are important factors especially for operation at low wind speeds. Savonius helix turbines are known to perform better than conventional models due to their spiral design that stabilizes torque, while the use of airfoil shape blades can increase torque by up to 10% compared to the traditional U-type. In this study, PLA material was chosen because it is lightweight and environmentally friendly, although it has disadvantages in the form of low melting point and brittle properties. To improve its mechanical performance, two structural variations are used, namely the solid structure as the control and the re-entrant sandwich structure as the core structure. Three-point bending testing showed that the solid structure had the highest flexural strength of 55 MPa, while the re-entrant structure had a value of 48.11 MPa. However, the results of static simulations using the Finite Element Method (FEM) show that the re-entrant structure is able to distribute the Von Mises voltage more evenly, thereby reducing the stress concentration in the critical area of the blade. In contrast, the solid structure showed the smallest total deformation at a load of 0.049 N for the blade and 0.1225 N for the turbine circuit, which signifies higher structural rigidity. The results of the Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation at a wind speed of 2 m/s show that the re-entrant structure produces a more stable flow pattern. Overall, solid structures excel in rigidity and flexural strength, while re-entrant structures are better in stress distribution and aerodynamic response.</i>



PENDAHULUAN

Kebutuhan energi terbarukan meningkat seiring dengan upaya global menuju pembangunan berkelanjutan. Sustainable Development Goals (SDGs) merupakan rencana aksi global untuk mencapai pembangunan berkelanjutan di berbagai aspek, terutama dalam penggunaan sumber energi terbarukan, yang tertuang pada SDGs 7 yang berfokus pada "Energi Bersih dan Terjangkau (Lead, 2016; Sambada & Ananta, 2020; Shafa Yuniar Yasmin et al., 2024). Energi angin menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang potensial, terutama di wilayah dengan intensitas angin rendah seperti Kalimantan Timur.

Turbin angin adalah alat yang dapat digunakan untuk mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik. Desain turbin angin yang baik menentukan performa Pembangkit Listrik Tenaga Angin. Untuk memanfaatkan energi angin dengan kondisi tersebut, turbin angin jenis Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) menjadi pilihan yang tepat untuk memanfaatkan energi angin yang rendah. Turbin angin sumbu vertikal (VAWT) merupakan turbin di mana sumbu rotornya berada pada arah vertikal. Karena sumbu rotor berada di arah vertikal, turbin ini tidak perlu diarahkan ke angin agar efektif membuat mereka menguntungkan untuk digunakan di lokasi yang arah angin sangat bervariasi. Pada Penelitian sebelumnya telah mendesain turbin angin Savonius helix unggul dibandingkan Savonius konvensional karena memiliki desain bilah spiral menunjukkan performa terbaik baik dari sisi torsi dibandingkan semua varian Savonius lainnya, dan mampu mulai berputar pada kecepatan angin rendah (Prabowo et al., 2023). Pada penelitian lainnya didapatkan hasil bahwa model turbin angin savonius airfoil shaped blade meningkatkan torsi lebih baik yaitu sebesar hingga 10% dibandingkan dengan model tradisional yaitu tipe U (Dinh Le et al., 2024). Selain itu penelitian mengenai respon struktural sandwich PLA dengan tipe re-entrant pada pembebanan statis dan dinamis masih belum banyak penelitian yang dikembangkan. Oleh karena itu, modifikasi bentuk bilah menjadi model Helix dan Airfoil dilakukan untuk meningkatkan performa aerodinamisnya.

Selain bentuk bilah, material yang digunakan juga berperan penting terhadap performa dan ketahanan turbin. Salah satu material yang dapat digunakan pada turbin angin vertikal yaitu material PLA (Polylactic Acid) yang merupakan salah satu biopolimer yang dapat terurai secara hayati, dapat diperbaharui, dan tidak beracun (Li & Chen, 2024). PLA dipilih karena bersifat ringan, mudah dibentuk, serta ramah lingkungan. Plastik asam polilaktat (PLA) merupakan salah satu biopolimer yang paling menjanjikan saat ini bahan baku utamanya adalah pati, yang dapat terurai secara hayati, dapat diperbaharui, dan tidak beracun. Kelebihan filamen PLA dalam dunia 3D printing tidak terlepas dari kemudahan filamen jenis ini untuk dicetak atau diproses. Sehingga material yang tepat digunakan pada turbin angin savonius yaitu PLA dikarenakan memiliki massa jenis yang rendah agar mudah bergerak pada kecepatan angin yang rendah.

Struktur sandwich didefinisikan sebagai bagian dari struktur komposit berlapis-lapis, yang dioptimalkan untuk kondisi pembebanan Struktur sandwich ini sangat cocok digunakan dalam kondisi lapangan, seperti saat menghadapi beban dari angin yang terus-menerus. Dengan desain yang tepat, struktur sandwich dapat memberikan kekakuan tinggi dan ketahanan lentur

yang baik, sekaligus mempertahankan bobot yang ringan. Struktur sandwich merupakan struktur multifungsi inovatif yang penting dengan keunggulan densitas rendah dan performa tinggi. Struktur komposit sandwich terdiri dari dua lapisan permukaan (skin) yang tipis, kaku, dan kuat, yang disatukan dengan inti (core) yang tebal, ringan. Skin adalah bagian yang berperan dalam menahan tegangan tarik (tensile stress) dan tekan (compressive stress). Core adalah bagian yang sangat penting dalam struktur sandwich, di mana core harus memiliki kekakuan yang cukup agar jarak antara lapisan permukaan tetap terjaga.

Berdasarkan pemaparan diatas penelitian yang akan dilakukan berfokus pada simulasi respon material PLA berstruktur sandwich pada turbin angin helix savonius airfoil shape blade. bagaimana respon material pada variasi struktur sandwich menggunakan material PLA terhadap beban struktural turbin angin sumbu vertikal Savonius airfoil shaped blade dengan pendekatan Finite Element Method. Kedua, bagaimana pengaruh variasi struktur sandwich dengan menggunakan material PLA terhadap flexural strength melalui pengujian three-point bending. Ketiga, bagaimana pengaruh variasi struktur sandwich menggunakan material PLA pada turbin angin sumbu vertikal Savonius airfoil shaped blade melalui simulasi Finite Element Method.

Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis respons mekanik material PLA dengan variasi struktur (solid dan sandwich re-entrant) pada bilah turbin angin helix Savonius bentuk airfoil. Secara lebih spesifik, penelitian ini bertujuan untuk: (1) Menganalisis pengaruh variasi struktur terhadap kekuatan lentur (*flexural strength*) melalui pengujian *three-point bending*; (2) Mengevaluasi distribusi tegangan (*Von Mises stress*) dan deformasi total pada bilah dan rangkaian turbin melalui simulasi statis berbasis *Finite Element Method* (FEM); serta (3) Menganalisis respons aerodinamis struktur melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi baik secara teoritis maupun praktis. Secara teoritis, penelitian ini akan memperkaya pemahaman mengenai perilaku mekanik material PLA berstruktur sandwich, khususnya konfigurasi re-entrant, di bawah pembebanan kompleks yang mensimulasikan kondisi operasional turbin angin. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan dan referensi dalam proses desain dan seleksi material untuk pengembangan turbin angin vertikal yang lebih ringan, kuat, dan efisien, khususnya untuk aplikasi di daerah berkecepatan angin rendah.

METODE PENELITIAN

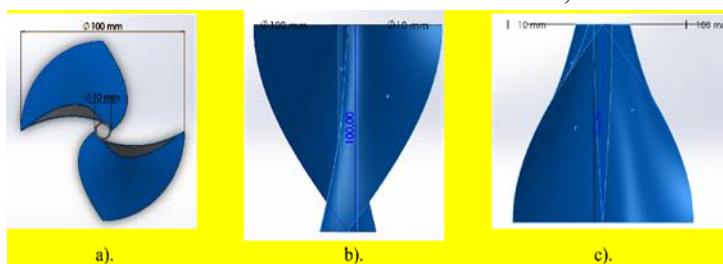
Desain Turbin Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) tipe Helix Savonius dengan bentuk bilah airfoil

Desain turbin yang digunakan adalah Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) tipe Helix Savonius dengan bentuk bilah airfoil. Variasi struktur yang digunakan terdiri dari struktur solid sebagai pembanding (kontrol) dan struktur sandwich honeycomb sebagai variasi utama. Model turbin angin yang digunakan adalah tipe helix Savonius dengan airfoil-shaped blade. Variasi struktur terdiri atas tipe solid (kontrol) dan re-entrant. Desain dibuat menggunakan perangkat lunak 3D CAD software dengan ukuran geometri sebagaimana ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 1. Desain rancangan turbin angin Helix Savonius Airfoil Shaped Blade

Variabel	Dimensi (mm)
Tinggi Turbin	100
Lebar Turbin	100
Poros Turbin	10
Tebal Blade	0,5

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024



Gambar 1. (a). Tampak atas (b). Tampak depan (c). Tampak samping Turbin angin Savonius Airfoil Shaped Blade.

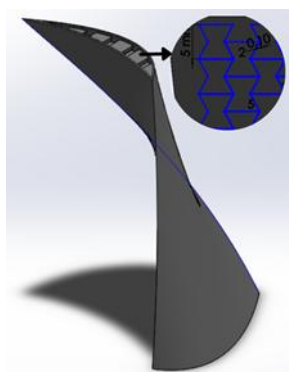
Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024

Struktur sandwich honeycomb memiliki konfigurasi inti berongga berbentuk heksagonal yang ditempatkan di antara dua lapisan kulit (*skin*) dari material PLA. Desain struktur ini dipilih karena mampu meningkatkan kekakuan dan ketahanan lentur tanpa menambah massa secara signifikan. Pembuatan model dilakukan dengan memperhatikan ketebalan kulit, diameter sel inti, serta jarak antar lapisan sesuai proporsi geometris blade turbin.

Tabel 2. Desain rancangan struktur sandwich jenis *Re-entrant*

Variabel	Dimensi (mm)
Tinggi	5
Lebar	5

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024



Gambar 2. blade turbin angin Savonius Airfoil Shaped Blade dengan Struktur Sandwich Re-entrant

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024

Pemilihan Material

Pada tahap ini, pemilihan material untuk turbin angin Savonius *Airfoil Shaped Blade* yaitu menggunakan material *Polylactic Acid* (PLA). Tujuan memilih jenis material ini pada turbin angin Savonius *Airfoil Shaped Blade* ialah untuk mengidentifikasi apakah dengan menggunakan material ini pada turbin angin Savonius *Airfoil Shaped Blade* dapat meningkatkan kekuatan, ketahanan, dan performa melalui *Static Simulation* dan *Computational fluid dynamics* (CFD).

Tabel 3. Sifat mekanik PLA Kamel et al. (2020)

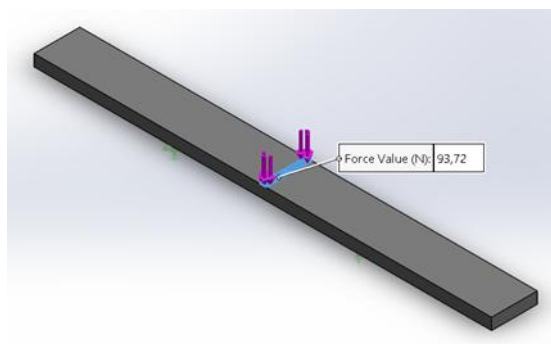
Sifat Mekanik	Nilai
Modulus Elastisitas	3,75 GPa
Poisson's Ratio	0,3897
Shear Modulus	0,862 GPa
Massa Jenis	1252 kg/m ³
Kekuatan Tarik	55 MPa
Tegangan Luluh	45 MPa

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024

Simulasi Statis

1. Pengujian static pada spesimen uji three point bending

Pengujian static pada spesimen uji three point bending dilakukan dengan menerapkan beban pada titik tengah spesimen sesuai konfigurasi pembebanan three point bending. Proses input beban ditunjukkan pada Gambar 2.3, di mana nilai load dimasukkan melalui fitur *External Loads* pada menu *Simulation* di 3D CAD software.



Gambar 3. simulasi static pada three point bending

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024

HASIL DAN PEMBAHASAN

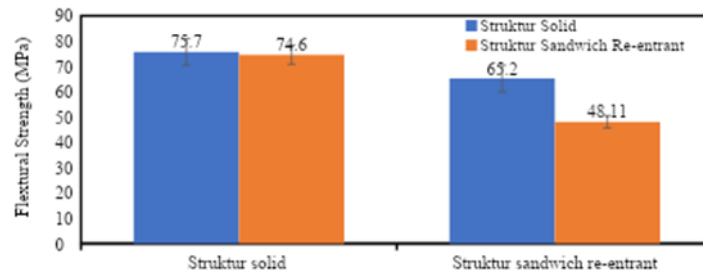
Analisis Hasil Pengujian Three Point Bending dan Simulasi Three Point Bending

Telah dilaksanakan pengujian *three point bending* dan simulasi *three point bending*. Adapun hasil dari pengujian secara aktual dan simulasi.

Tabel 4. Data hasil pengujian *three point bending* secara aktual

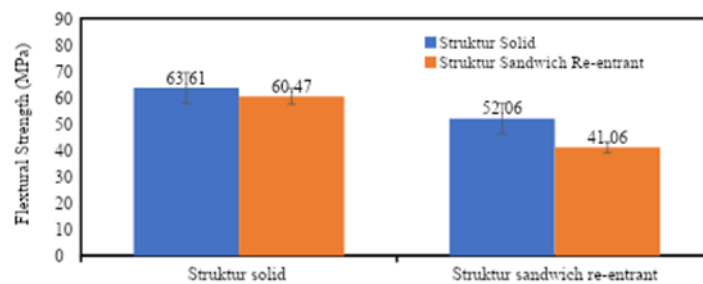
Variasi Struktur	Massa gram (g)	Flextural Strength (MPa)	Standar Deviasi
Struktur Solid	6,06	74,7	1,96
Struktur Sandwich <i>Re-entrant</i>	5,94	48,11	1,23

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024

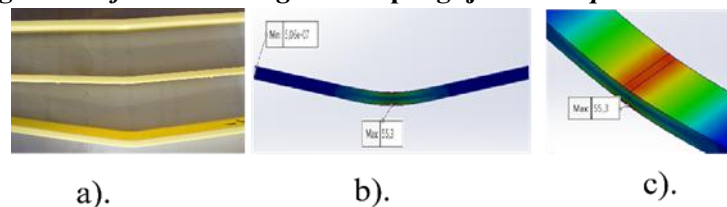


Gambar 4. Perbandingan nilai *flexural strength* hasil pengujian *three point bending* secara actual dan simulasi

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024

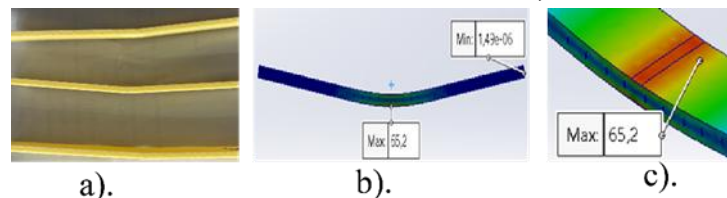


Gambar 5. Perbandingan nilai *flexural strength* hasil pengujian *three point bending* secara actual



Gambar 6. Hasil pengujian *three point bending* a). actual dan b). simulasi pada spesimen uji dengan struktur *solid* c). letak *maximum stress*

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024



Gambar 7. Hasil pengujian *three point bending* a). actual dan b). simulasi pada spesimen uji dengan struktur *sandwich re-entrant* c). letak *maximum stress*

Sumber: Hasil Pengujian dan Simulasi Penelitian, 2024

Berdasarkan data pada Tabel 4, nilai standar deviasi menggambarkan tingkat variasi hasil uji *flexural strength* antar spesimen untuk struktur solid dan *re-entrant* yang diuji menggunakan metode *three-point bending*. Struktur solid menunjukkan nilai standar deviasi tertinggi, yaitu

sebesar 1,96 MPa, yang mengindikasikan adanya penyebaran nilai yang cukup besar dari rata-rata, sehingga hasil uji pada struktur ini cenderung kurang konsisten meskipun memiliki nilai kekuatan lentur tertinggi sebesar 74,7 MPa sementara itu, struktur *sandwich* dengan konfigurasi *re-entrant* mencatatkan nilai standar deviasi sebesar 1,23 MPa, yang menunjukkan tingkat variasi hasil uji yang lebih kecil dibandingkan struktur solid. Secara keseluruhan, nilai standar deviasi pada pengujian ini memberikan informasi yang relevan terkait kestabilan hasil kekuatan lentur dari masing - masing struktur.

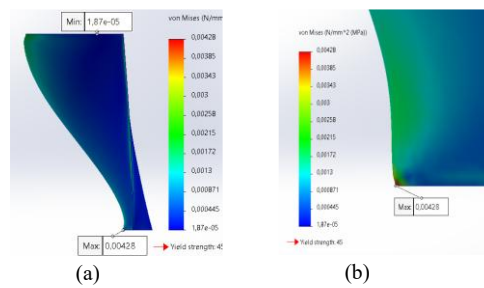
Gambar 5 menunjukkan perbandingan nilai *flexural strength* hasil pengujian *three point bending* secara aktual dan simulasi terhadap material PLA dilakukan pada masing - masing struktur yaitu struktur solid dan struktur *sandwich re-entrant*. Hasilnya menunjukkan bahwa struktur solid mencatat nilai *flexural strength* pada pengujian secara aktual tertinggi sebesar 74,7 MPa yang terendah adalah struktur *re-entrant* sebesar 48,11 MPa. Struktur *solid* memiliki nilai tertinggi pada hasil simulasi yaitu 75,7 MPa dan *sandwich re-entrant* 65,2 MPa. Terjadi perbedaan hasil antara data simulasi dan data aktual disebabkan oleh perbedaan pendekatan perhitungan, khususnya pada struktur *sandwich*. Perbedaan yang cukup signifikan terjadi karena struktur *sandwich* menggunakan prinsip dan rumus perhitungan yang berbeda yang mengacu pada standar ASTM C393 sementara struktur solid mengacu pada standar ASTM D790, terutama dalam aspek *flexural strength*. Dalam simulasi, nilai σ (tegangan) tidak dihitung secara manual, melainkan diperoleh secara numerik melalui pembebanan pada model 3D yang sudah di mesh, lalu perangkat lunak menghitung respons struktur terhadap gaya, termasuk deformasi dan tegangan, berdasarkan sifat mekanik material yang dimasukkan Hal ini menyebabkan hasil simulasi dan pengujian aktual pada struktur *sandwich* tidak sepenuhnya selaras.

Struktur solid menunjukkan performa paling unggul dalam pengujian *three-point bending* secara aktual, dengan nilai *flexural strength* tertinggi mencapai 74,7 MPa. Hal ini terjadi karena material solid tidak memiliki rongga di dalamnya, sehingga gaya dapat didistribusikan secara merata ke seluruh penampang. Spesimen PLA dengan struktur dengan struktur solid menghasilkan kekuatan lentur dibandingkan spesimen yang memiliki struktur internal. Struktur *re-entrant* dikenal dengan sifat *auxetic* (mengembang ke samping) yang cocok untuk aplikasi tahan benturan (Nugroho et al., 2018). Namun, dalam pengujian *three-point bending*, struktur ini menunjukkan kelemahan karena arah deformasi selnya tidak sejajar dengan arah beban lentur yang bekerja dari atas ke bawah. PLA dengan inti *re-entrant* menunjukkan kemampuan deformasi tinggi dan penyerapan energi yang baik, namun tetap memiliki *flexural strength* yang lebih rendah Ini terjadi karena hilangnya kekakuan pada saat dibebani (Choudhry et al., 2022).

Analisis Von Misses Stress

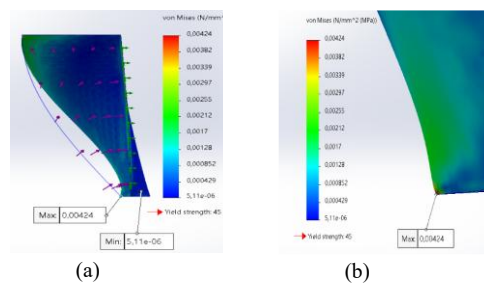
Vonmisses terjadi ketika energi *distorsi* atau regangan geser dalam suatu material mencapai batas tertentu yang menyebabkan terjadinya deformasi. Suatu material dinyatakan mengalami luluh apabila tegangan Von Mises yang dihitung menyamai atau melebihi nilai tegangan luluh (*yield strength*) yang telah ditentukan (Hamid & Avicenna Luthfie, 2022).

1. Analisis Von Misses Stress Pada Blade Turbin Angin Helix Savonius Airfoil-Shaped Blade

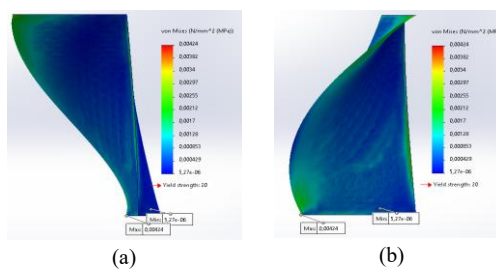


Gambar 8. Hasil simulasi *von mises* pada blade turbin angin *helix Savonius Airfoil-Shaped Blade* dengan struktur solid menggunakan material PLA a). tampak depan, b). letak *maximum stress*

Sumber: Hasil Pengujian dan Simulasi Penelitian, 2024)

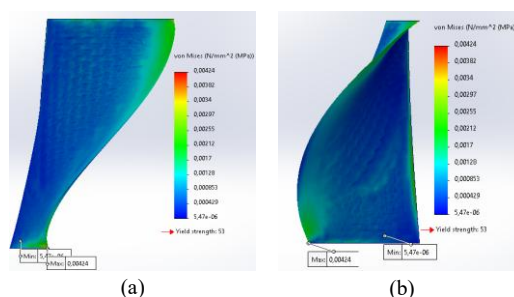


Gambar 9. Hasil simulasi *von mises* pada *blade* turbin angin *helix Savonius Airfoil-Shape Blade* dengan struktur *sandwich re-entrant* menggunakan material PLA a). tampak depan, b). letak *maximum stress*



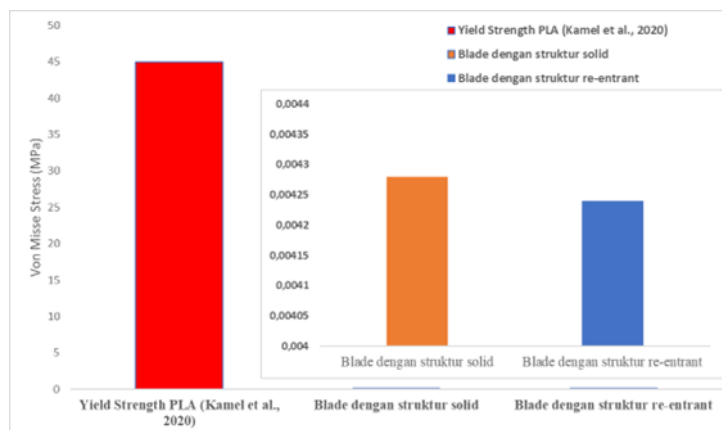
Gambar 10. Hasil simulasi *von mises* pada *blade* turbin angin *helix Savonius Airfoil-Shape Blade* dengan struktur *sandwich re-entrant* menggunakan material ABS a). tampak depan, b). letak *maximum stress*

Sumber: Hasil Simulasi FEM Penelitian, 2024



Gambar 11. Hasil simulasi von mises pada *blade* turbin angin *helix* Savonius *Airfoil-Shape* Blade dengan struktur *sandwich re-entrant* menggunakan material PTEG a). tampak depan, b). letak *maximum stress*

Sumber: Hasil Simulasi FEM Penelitian, 2024



Gambar 12. Perbandingan nilai konsentrasi tegangan maksimum pada *blade* turbin setiap variable

Sumber: Hasil Simulasi FEM Penelitian, 2024

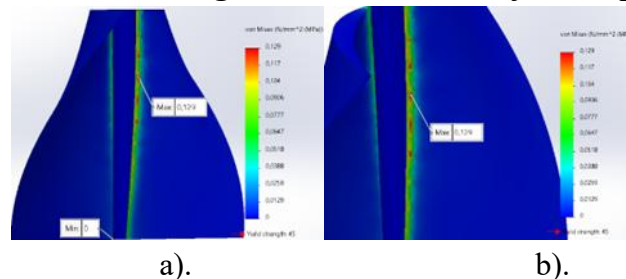
Hasil simulasi dalam bentuk kontur distribusi konsentrasi tegangan maksimum dapat dilihat pada Gambar 5 hingga Gambar 7, sedangkan perbandingan nilai konsentrasi tegangan maksimum antar struktur disajikan pada Gambar 8. Dari hasil tersebut diketahui bahwa blade dengan struktur solid menghasilkan tegangan maksimum sebesar 0,00428 MPa, dan struktur *re-entrant* memiliki tegangan maksimum paling rendah yaitu 0,00424 MPa, dari hasil tersebut seluruh tegangan maksimum belum melewati nilai *yield strength* sehingga tergolong aman digunakan pada turbin angin dengan kecepatan angin rendah. Secara visual, keempat variabel menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan muncul pada area ujung bawah blade, hal ini disebabkan oleh bentuk geometri ujung *blade* yang tajam sehingga tidak dapat mendistribusikan tegangan secara optimal. Menurut Hussin et al. (2020) menunjukkan bahwa pada turbin Savonius, Konsentrasi tegangan cenderung terjadi pada ujung bawah *blade* akibat distribusi beban yang tidak merata.

Perbandingan antar desain struktur material sangat berpengaruh terhadap sebaran dan tegangan von Mises pada *blade* turbin. Struktur solid menghasilkan nilai tegangan yang relatif rendah, namun menunjukkan distribusi tegangan yang lebih terpusat karena bentuk struktur yang padat yang menyebabkan tegangan terkonsentrasi pada area tertentu yang langsung menerima beban, dapat dilihat pada gambar 4, terutama di bagian ujung bawah *blade*, struktur solid memberikan beban langsung ke titik tertentu, sehingga berpotensi menyebabkan konsentrasi tegangan pada area tersebut.

Struktur *sandwich re-entrant* sebagai konfigurasi paling optimal berdasarkan hasil simulasi, karena menghasilkan nilai tegangan maksimum terendah sekaligus distribusi tegangan yang paling merata dibandingkan dengan semua variasi lainnya. Sifat dari struktur *re-entrant*, yaitu sifat auxetic (mengembang ke samping), yang menyebabkan material mengembang ke arah samping ketika mengalami tegangan fenomena ini memungkinkan

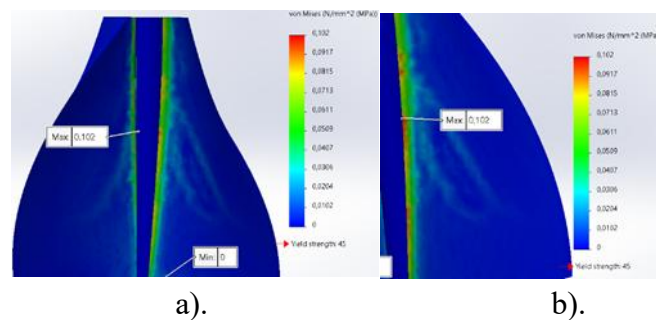
penyebaran beban secara lebih menyeluruh ke seluruh volume struktur, sehingga mengurangi konsentrasi tegangan. Pada struktur inti *auxetic re-entrant* yang diterapkan pada panel *sandwich blade* turbin angin menunjukkan kestabilan struktural (Khalid et al., 2022).

2. Analisis Von Misses Stress Turbin Angin Helix Savonius Airfoil-Shaped Blade



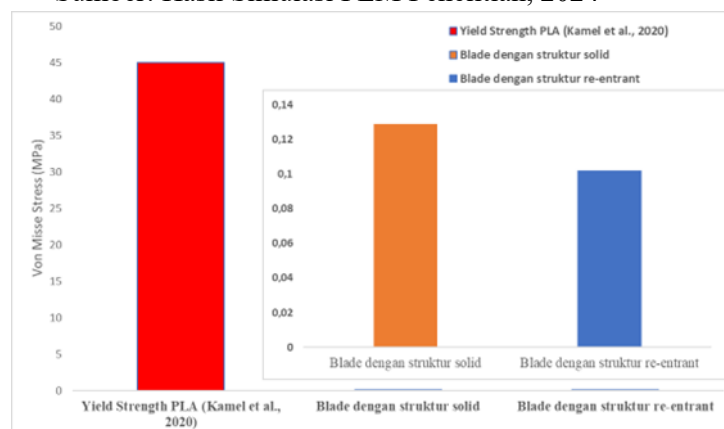
Gambar 13. Hasil simulasi von mises pada rangkaian turbin angin helix Savonius Airfoil-Shape Blade dengan struktur solid a). tampak samping, b). letak maximum stress

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024



Gambar 14. Hasil simulasi von mises pada rangkaian turbin angin helix Savonius Airfoil-Shape Blade dengan struktur sandwich re-entrant a). tampak samping, b). letak maximum stress

Sumber: Hasil Simulasi FEM Penelitian, 2024



Gambar 15. Perbandingan nilai konsentrasi tegangan maksimum pada rangkaian turbin setiap variabel

Sumber: Hasil Simulasi FEM Penelitian, 2024

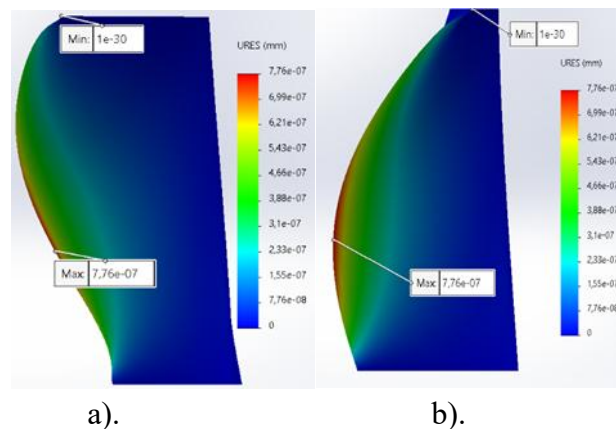
Hasil simulasi dalam bentuk kontur distribusi konsentrasi tegangan maksimum dapat dilihat pada Gambar 8 hingga Gambar 9. Dari hasil tersebut diketahui bahwa blade dengan struktur solid menghasilkan tegangan maksimum sebesar 0,129 MPa (solid), dan 0,102 MPa

(*re-entrant*). dari hasil tersebut seluruh tegangan maksimum belum melewati nilai *yield strength*. Grafik perbandingan konsentrasi tegangan maksimum menunjukkan bahwa struktur *sandwich re-entrant* memiliki nilai terendah, menandakan distribusi tegangan yang lebih merata. Struktur *re-entrant* terbukti sebagai konfigurasi terbaik pada rangkaian turbin karena mampu mendistribusikan tegangan secara merata dan mengurangi konsentrasi tegangan. Keunggulan ini juga terlihat pada *blade*, di mana struktur *re-entrant* memberikan ketahanan terbaik dengan mengurangi konsentrasi tegangan berlebih pada bagian ujung bawah *blade*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa lokasi konsentrasi tegangan maksimum terjadi pada area sekitar sambungan poros turbin. Fenomena ini disebabkan oleh area tersebut merupakan titik tumpuan struktural di mana terjadi momen puntir. Area pangkal merupakan transisi antara *blade* dan poros yang relatif kaku, menyebabkan gradien tegangan tinggi. Hal ini didukung oleh penelitian Gukendran et al. (2021), yang menunjukkan bahwa *root blade* adalah area paling kritis terhadap kegagalan struktural akibat kombinasi beban rotasi dan aerodinamika.

3. Analisis Total Deformation

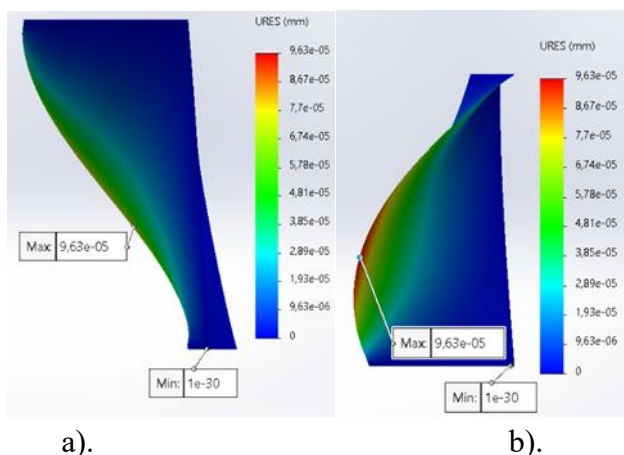
Total *deformation* merupakan salah satu bentuk perubahan geometris yang terjadi pada model struktur sebagai respons terhadap pembebanan selama fase operasional. Dalam konteks simulasi berbasis elemen hingga, total deformasi menggambarkan sejauh mana suatu titik dalam material mengalami perpindahan dari posisi awalnya akibat gaya luar atau tekanan yang diberikan (Yaqin et al., 2021).

4. Analisis Total Deformation Pada Blade Turbin Angin Helix Savonius Airfoil-Shaped Blade



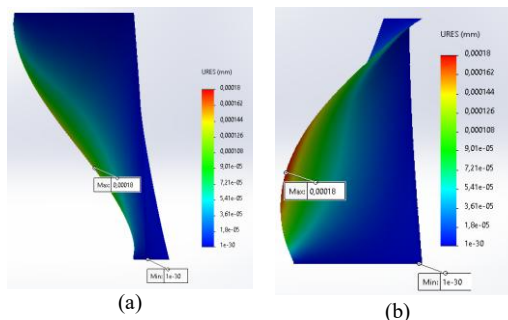
Gambar 16. Deformasi pada *blade* turbin angin *helix Savonius Airfoil-Shape Blade* dengan struktur *solid* menggunakan material PLA a). tampak *depan* b). tampak *samping*

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024

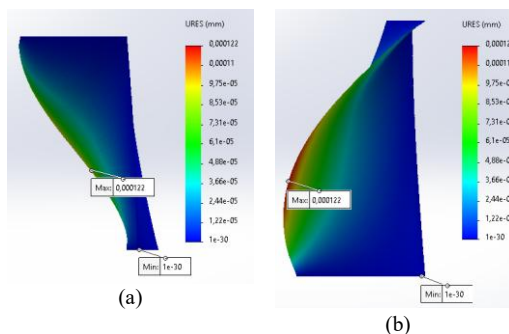


Gambar 17. Deformasi pada blade turbin angin *helix Savonius Airfoil-Shape Blade* dengan struktur *sandwich re-entrant* menggunakan material PLA a). tampak depan b). tampak samping

Sumber: Hasil Simulasi FEM Penelitian, 2024

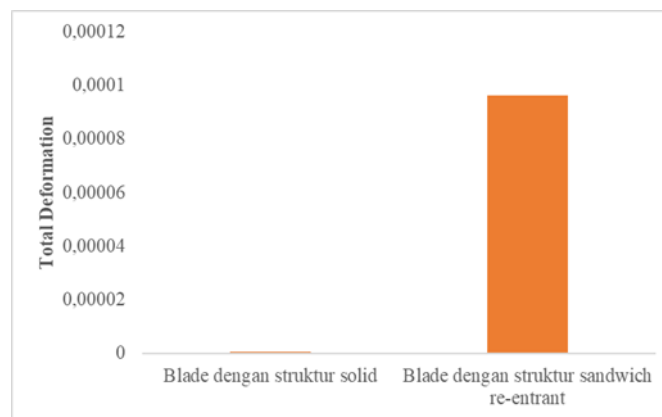


Gambar 18. Deformasi pada blade turbin angin *helix Savonius Airfoil-Shape Blade* dengan struktur *sandwich re-entrant* menggunakan material ABS a). tampak depan b). tampak samping



Gambar 19. Deformasi pada blade turbin angin *helix Savonius Airfoil-Shape Blade* dengan struktur *sandwich re-entrant* menggunakan material PETG a). tampak depan b). tampak samping

Sumber: Hasil Simulasi FEM Penelitian, 2024



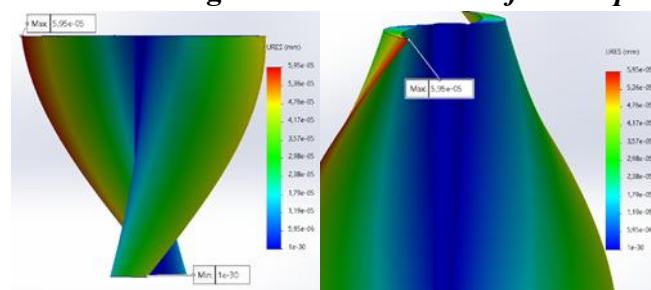
Gambar 20. Perbandingan nilai total *deformation* pada *blade* turbin setiap variabel

Sumber: Hasil Simulasi FEM Penelitian, 2024

Gambar 13 dan Gambar 14 menggambarkan deformasi maksimum (URES dalam mm) pada blade dengan dua jenis struktur solid ($7,78e-07$ mm), dan *sandwich re-entrant* ($9,63e-05$ mm). Dari grafik perbandingan pada gambar 3.11, terlihat bahwa struktur solid memiliki deformasi lebih kecil, sementara *blade* dengan struktur *sandwich re-entrant* menampilkan kombinasi yang cukup baik.

Struktur solid menunjukkan performa mekanik paling unggul karena distribusi tegangan yang merata dan tidak memiliki rongga internal, yang berkontribusi terhadap persebaran tegangan secara merata di seluruh volume material. Ketahanan deformasi yang tinggi pada struktur ini menunjukkan bahwa konfigurasi solid sangat efektif dalam menahan beban statik. Material PLA solid memiliki stabilitas dimensi yang baik saat menerima beban tekan (Vindokurov et al., 2024). Struktur *re-entrant*, meskipun memiliki sifat *auxetic* yang secara teoritis meningkatkan ketahanan terhadap gaya tekan, tetap menunjukkan nilai deformasi yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa efek *auxetic* tidak dapat dimanfaatkan secara optimal apabila dinding vertikal tidak memiliki ketebalan yang memadai, tanpa penguatan struktural tambahan, geometri *re-entrant* cenderung mengalami kegagalan (Li et al., 2024).

5. Analisis *Deformation* Turbin Angin *Helix Savonius Airfoil-Shaped Blade*

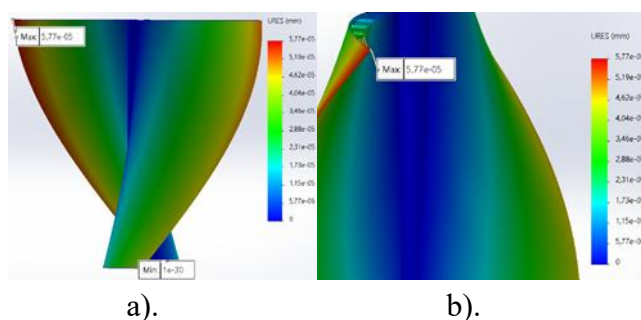


a).

b).

Gambar 21. Deformasi pada turbin angin *helix Savonius Airfoil-Shape Blade* dengan struktur solid a). tampak *depan* b). tampak *samping*

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024



Gambar 22. Deformasi pada turbin angin *helix Savonius Airfoil-Shape Blade* dengan struktur *sandwich re-entrant* a). tampak depan b). tampak samping

Sumber: Hasil Simulasi FEM Penelitian, 2024



Gambar 23. Perbandingan nilai deformation pada rangkaian turbin setiap variabel

Sumber: Hasil Simulasi FEM Penelitian, 2024

Gambar 16 dan Gambar 17 menggambarkan total deformasi (URES dalam mm) pada blade dengan dua jenis struktur. Struktur *sandwich re-entrant* memiliki deformasi paling kecil yaitu $5,77e-05$ mm. Struktur solid menempati urutan kedua dengan $5,95e-05$ mm, Hasil pembahasan sebelumnya menunjukkan bahwa struktur solid merupakan konfigurasi paling efektif dalam meminimalkan deformasi pada komponen blade, karena sifat kekakuan. Namun, ketika struktur tersebut diaplikasikan pada rangkaian turbin secara keseluruhan, pola deformasi mengalami pergeseran. Struktur *re-entrant*, yang sebelumnya menunjukkan performa kurang optimal pada *blade*, justru menghasilkan nilai deformasi paling rendah pada rangkaian turbin. Hasil simulasi menunjukkan nilai deformasi total maksimum terjadi pada bagian ujung *blade* turbin hal ini disebabkan oleh beberapa, Salah satunya, bagian ujung *blade* memiliki jarak paling jauh dari poros turbin, sehingga menerima momen lentur terbesar akibat gaya yang bekerja.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian *three-point bending* secara eksperimental dan simulasi menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*), dapat disimpulkan bahwa struktur solid memiliki nilai kekuatan lentur (*flexural strength*) tertinggi sebesar 55 MPa berdasarkan pengujian aktual, sementara hasil simulasi menunjukkan bahwa struktur *sandwich re-entrant* memiliki kinerja terbaik dalam menahan beban dengan tegangan *von Mises* terendah pada blade sebesar 0,00424 MPa dan pada rangkaian turbin sebesar 0,102 MPa. Deformasi

terkecil pada blade ditemukan pada struktur solid sebesar 0,000000776 mm, sedangkan deformasi paling optimal pada rangkaian turbin dicapai oleh struktur *re-entrant* sebesar 0,0000577 mm, yang menunjukkan bahwa pemilihan struktur sandwich *re-entrant* memberikan kombinasi optimal antara kekuatan dan deformasi minimum untuk operasional turbin angin vertikal tipe Savonius *airfoil shape blade*. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan uji tarik guna memperoleh nilai *yield strength* material, mengacu pada standar pengujian yang relevan agar hasil lebih akurat, serta menjadikan penelitian ini sebagai referensi awal bagi mahasiswa dalam merancang metode pengujian yang lebih sistematis.

REFERENSI

- Choudhry, N. K., Bankar, S. R., Panda, B., & Singh, H. (2022). Experimental and numerical analysis of the bending behavior of 3D printed modified auxetic sandwich structures. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1356–1363. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.425>
- Dinh Le, A., Nguyen Thi Thu, P., Ha Doan, V., The Tran, H., Duc Banh, M., & Truong, V. T. (2024). Enhancement of aerodynamic performance of Savonius wind turbine with airfoil-shaped blade for the urban application. *Energy Conversion and Management*, 310, 118469. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118469>
- Gukendran, R., Sambathkumar, M., Sabari, C., Raj, C. R. R., & Kumar, V. R. (2021). Structural analysis of composite wind turbine blade using ANSYS. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1011–1016. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.341>
- Hamid, A., & Avicenna Luthfie, A. (2022). Simulasi uji bending pada shaft generator awing 500 watt dengan material ASTM A36 menggunakan software CAD. *Jurnal Teknik Mesin*, 11(2), 131–138.
- Hussin, M. S. F., Jumaidin, R., Ali, N. M., Fauzi, M. A., Saat, S., Sadun, A. S., Yassim, H. M., & Ahmad, E. Z. (2020). Conceptual design and structure analysis of Savonius vertical axis wind turbine under low wind speed. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 71(2), 178–187. <https://doi.org/10.37934/arfmts.71.2.178187>
- Kamel, H., Harraz, O., Azab, K., & Attia, T. (2020). Developing an optimized low-cost transtibial energy storage and release prosthetic foot using three-dimensional printing. *Journal of Engineering and Science in Medical Diagnostics and Therapy*, 3(2). <https://doi.org/10.1115/1.4046319>
- Khalid, S. A., Khan, A. M., & Shah, O. R. (2022). A numerical study into the use of auxetic structures for structural damping in composite sandwich core panels for wind turbine blades. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 144(3), 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.4051303>
- Lead. (2016). Sustainable Development Goals (SDGs) 2015-2030. *Briefing Note*, (June).
- Li, C., Ma, N., Deng, Q., & Han, Q. (2024). Deformation and energy absorption of the laminated reentrant honeycomb structures under static and dynamic loadings. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31(11), 2472–2482. <https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2158505>

- Li, Z., & Chen, Y. (2024). Behavioral effects of polylactic acid microplastics on the tadpoles of *Pelophylax nigromaculatus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 285, 117146. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117146>
- Nugroho, A., Ardiansyah, R., Rusita, L., & Larasati, I. L. (2018). Effect of layer thickness on flexural properties of PLA (PolyLactic Acid) by 3D printing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1130(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1130/1/012017>
- Prabowo, H., Wijayanto, D. S., Saputra, T. W., & Bakar, Mohd. S. Bin. (2023). The optimization of Savonius helix wind turbine cut-in speed with the variation of blades-twist rotor and number of blades. *Jiptek*, 16(2), 81–94. <https://doi.org/10.20961/jiptek.v16i2.71389>
- Sambada, FA. R., & Ananta, F. (2020). Peningkatan Efisiensi Distilasi Air Energi Surya Menggunakan Pengapung. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 13(2). <https://doi.org/10.24843/jem.2020.v13.i02.p05>
- Shafa Yuniar Yasmin, Feri Febrian Syah, M. Ashof Azria Azka, & Didik Aribowo. (2024). Energi Surya Sebagai Solusi Dalam Peningkatan Efisiensi Energi Perspektif SDGs 7 (Sustainable Development Goals 7) 2030. *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, 2(2). <https://doi.org/10.61132/venus.v2i2.252>
- Vindokurov, I., Pirogova, Y., Tashkinov, M., & Silberschmidt, V. V. (2024). Compression of additively manufactured PLA for biomedical applications: Effects of test conditions on properties of solid samples. *Polymer Testing*, 130, 108320. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108320>
- Yaqin, R. I., Priyambodo, B. H., Prasetyo, A. B., & Umar, M. L. (2021). Penerapan metode elemen hingga dalam pemilihan bahan pada desain pisau mesin pencacah plastik. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 6(2), 85–98. <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v6i2.190>