

# ANALISIS PERBANDINGAN KEKUATAN BILAH TURBIN ANGIN HORIZONTAL DAN VERTIKAL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

1<sup>st</sup> Raihan Handi Ananda  
Teknik Mesin

UPN Veteran Jakarta  
Jakarta, Indonesia  
1910311039 raihanha@upnvj.ac.id

2<sup>nd</sup> Sigit Pradana  
Teknik Mesin

UPN Veteran Jakarta  
Jakarta, Indonesia  
sigit.pradana@upnvj.ac.id

3<sup>rd</sup> Damora Rhakasywi  
Teknik Mesin

UPN Veteran Jakarta  
Jakarta, Indonesia  
rhakasywi@upnvj.ac.id

**Kebutuhan energi terbarukan di Indonesia mendorong pemanfaatan energi angin skala kecil, namun kendala biaya investasi dan manufaktur bilah menjadi tantangan utama. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan kekuatan struktur bilah turbin angin sumbu horizontal (HAWT) dengan profil SG6043 untwisted dan sumbu vertikal (VAWT) tipe H-Darrieus dengan profil NACA 0018 menggunakan material kayu mahoni dan plastik PETG. Metode penelitian menggunakan simulasi Finite Element Method (FEM) pada perangkat lunak ANSYS Workbench 2025 R1 dengan variasi kecepatan angin 12 m/s, 25 m/s, dan 50 m/s serta kecepatan rotasi konstan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain VAWT dengan tumpuan dua sisi (fixed-fixed) memiliki kekakuan struktural yang jauh lebih tinggi dibandingkan HAWT (cantilever). Pada kondisi badai (50 m/s), deformasi maksimum VAWT bermaterial PETG hanya sebesar 8,29 mm, sementara HAWT mencapai 110,74 mm. Fenomena unik ditemukan pada HAWT bermaterial PETG, di mana fleksibilitas material menyebabkan pelengkungan bilah (blade flexing) yang menurunkan tegangan maksimum menjadi 13,72 MPa dibandingkan kayu mahoni yang mencapai 29,27 MPa. Seluruh skenario penggunaan PETG dinyatakan aman dengan Faktor Keamanan (Safety Factor) di atas 2,0. Kesimpulannya, PETG merupakan material substitusi yang layak untuk bilah turbin skala kecil, dan konfigurasi VAWT lebih optimal dalam menjaga stabilitas dimensi saat menggunakan material polimer.**

**Kata kunci : HAWT, VAWT, PETG, Kayu Mahoni, Metode Elemen Hingga, Safety Factor.**

## I. PENDAHULUAN

Saat ini, kebutuhan energi global terus meningkat tajam, namun ketergantungan terhadap bahan bakar fosil masih mendominasi yang berdampak pada kerusakan lingkungan. Di Indonesia, upaya transisi energi telah memiliki landasan hukum yang kuat melalui Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), yang

menargetkan bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) mencapai 23% pada tahun 2025. Salah satu potensi EBT yang strategis adalah energi angin, namun kendala utama pemanfaatan energi angin skala kecil di masyarakat adalah tingginya biaya investasi dan kesulitan manufaktur bilah (*blade*) turbin. [1]

Secara teknologi, turbin angin dibagi menjadi dua jenis: *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). HAWT umumnya lebih efisien, terutama jika menggunakan *airfoil* khusus kecepatan rendah seperti seri SG6043. Namun, bilah HAWT idealnya harus memuntir (*twisted*), yang sulit diproduksi secara manual. Sebagai alternatif, VAWT tipe H-Darrieus menawarkan desain bilah lurus yang lebih sederhana. Untuk mengatasi masalah biaya produksi yang mahal, teknologi *3D Printing* (FDM) menawarkan solusi pembuatan bilah turbin yang cepat dan murah menggunakan material plastik PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*). Namun, tantangan utamanya adalah kekakuan (*stiffness*) PETG yang jauh lebih rendah dibandingkan kayu, yang berisiko menyebabkan bilah melengkung berlebihan (*excessive deformation*) saat angin kencang.

Oleh karena itu, diperlukan analisis kekuatan struktur yang mendalam menggunakan simulasi komputer (*Finite Element Method*) untuk memastikan apakah desain bilah berbahan plastik ini aman digunakan sebelum diproduksi. Penelitian ini membandingkan desain HAWT (SG6043) dan VAWT (NACA 0018) menggunakan material PETG dibandingkan dengan Kayu Mahoni sebagai standar.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang paling menjanjikan, berasal dari konversi energi kinetik pergerakan massa udara menjadi energi mekanik dan selanjutnya energi listrik. Secara fisika, pergerakan angin disebabkan oleh gradien tekanan atmosfer yang dipengaruhi oleh pemanasan tidak merata dari radiasi matahari, rotasi bumi, dan topografi permukaan bumi. [2]

B. Analisis Statik

Analisis statik merupakan salah satu metode untuk mengetahui kekuatan struktur suatu komponen saat diberikan suatu pembebanan statik. Saat suatu komponen menerima tegangan dibawah kekuatan luluh materialnya, komponen tersebut dapat dikatakan aman dan tidak akan mengalami kegagalan akibat tegangan besar. [3]

1) Tegangan (stress)

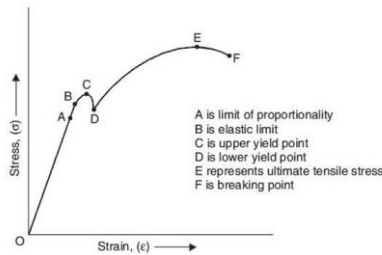
Tegangan (stress) adalah reaksi dalam suatu komponen yang muncul akibat gaya luar yang diberikan pada komponen itu sendiri. Gaya yang bekerja pada suatu komponen per satuan luas dengan satuan  $N/m^2$  atau  $MPa$  disebut dengan tegangan.

2) Regangan (Strain)

Regangan merupakan ukuran dari perubahan bentuk atau deformasi yang terjadi pada suatu benda akibat tegangan. Regangan menunjukkan seberapa banyak benda mengalami pemanjangan atau pemendekan relatif terhadap panjang awalnya.

3) Kekuatan Luluh

Kekuatan luluh merupakan kemampuan suatu komponen dalam menahan dan menerima beban tanpa melewati batas elastisitasnya, sehingga komponen tersebut tidak mengalami deformasi permanen. Kekuatan ini ditandai dengan titik dimana suatu komponen mulai kehilangan sifat elastisnya dan memasuki fase plastis. Jika tegangan yang diterapkan melampaui nilai luluh, material tidak dapat kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan.



Gambar 1. Diagram Tegangan Regangan

C. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang dapat digunakan untuk memecahkan masalah kompleks dalam berbagai bidang teknik dan ilmu pengetahuan dengan tingkat ketelitian yang dapat diterima. Metode elemen hingga menunjukkan apakah suatu produk akan pecah, aus, bekerja sesuai dengan fungsinya, dan untuk memprediksi apa yang akan terjadi pada saat produk digunakan. Persamaan matematika membantu memprediksi perilaku masing elemen. Metode ini merupakan teknik dengan kalkulasi yang paling kuat dan akurat dalam sebuah struktur yang bekerja pada kondisi beban dan batas yang diketahui. [4]

Metode elemen hingga atau *finite element method* merupakan metode yang dilakukan dengan membagi bagian yang akan dianalisis menjadi bagian-bagian yang lebih kecil yang kemudian dianalisis dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan hasil keseluruhan. Bagian-bagian kecil ini yang kemudian disebut dengan elemen, lalu antara satu elemen

dengan elemen lain dihubungkan dengan titik nodal yang disebut dengan node, sedangkan proses pembagiannya menjadi beberapa bagian disebut meshing.

D. Persamaan Dasar Aerodinamika

Nilai pembebanan aerodinamika pada bilah turbin angin dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan pendekatan *Blade Element Theory* (BET). Pendekatan ini merepresentasikan gaya aerodinamika yang bekerja pada bilah sebagai tekanan permukaan ekuivalen yang dihasilkan oleh kecepatan relatif aliran udara terhadap elemen bilah. Pada simulasi struktur ini menggunakan ANSYS, pembebanan aerodinamika diterapkan melalui kombinasi: [5]

1. Tekanan permukaan (*surface pressure*)
2. Kecepatan rotasi (*rotational velocity*)

Tekanan aerodinamika diturunkan dari persamaan gaya angkat sebagai berikut:

$$F = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 A C_L \tag{1}$$

Dengan membagi gaya terhadap luas permukaan, diperoleh persamaan tekanan aerodinamika:

$$P = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C_L \tag{2}$$

Kecepatan Relatif bilah HAWT

$$V_{rel}(r) = \sqrt{V_{angin}^2 + (\omega r)^2} \tag{3}$$

Kecepatan Relatif bilah VAWT

$$V_{rel} = V_{angin} + (\omega r) \tag{4}$$

E. Material Kayu dan PETG

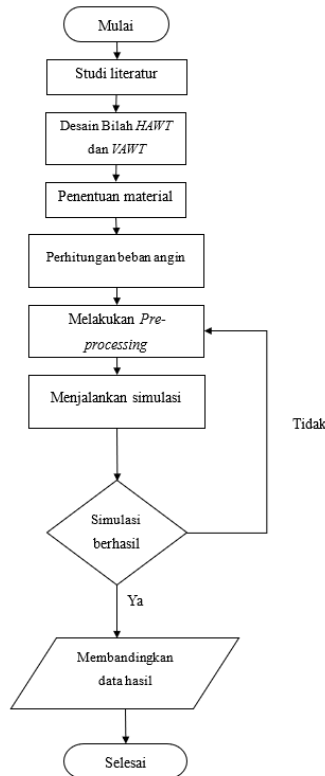
Kayu mahoni (*Swietenia macrophylla*) adalah spesies pohon tropis dari famili Meliaceae, berasal dari Amerika Tengah dan Selatan, tetapi dibudidayakan secara luas di Indonesia untuk kayu komersial. Secara umum, kayu mahoni dikenal sebagai hardwood dengan warna merah kecoklatan yang menarik, sering digunakan untuk furnitur, lantai, dan instrumen musik karena kestabilan dimensi dan kemudahan pengerjaan. [6] Kayu ini memiliki struktur serat yang lurus hingga interlocked, dengan tekstur medium dan luster alami sedang, membuatnya tahan terhadap pemuaihan akibat kelembaban Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) adalah kopolimer termoplastik amorf yang dimodifikasi dari PET dengan penambahan glikol untuk meningkatkan fleksibilitas dan kemudahan pemrosesan. Secara umum, PETG merupakan material polimer yang transparan, tahan benturan, dan ramah lingkungan (dapat didaur ulang), sering digunakan dalam kemasan makanan, botol, dan aplikasi medis karena ketahanan kimia terhadap asam, basa, dan pelarut. Dalam konteks 3D printing FDM, PETG populer karena adhesi lapisan baik, minim warping, dan

ketahanan suhu hingga 80°C, membuatnya cocok untuk prototipe fungsional seperti bilah turbin. [7]

diperkecil lagi, sehingga efisiensi waktu komputasi dapat tercapai tanpa mengurangi akurasi. Perbedaan kurang dari 5 %.



III. METODE PENELITIAN



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

A. Modelling Properties

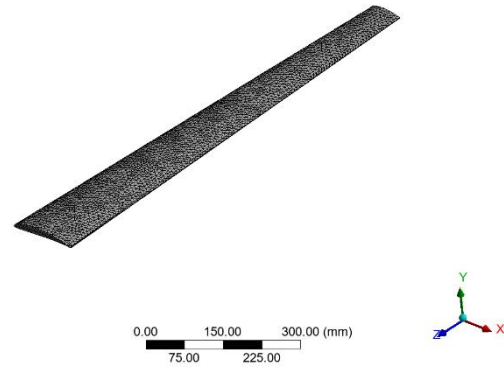
Tabel 1. Mechanical Properties

	Kayu Mahoni	PETG	
Modulus Young	10	2,1	GPa
Densitas	590	1270	kg/m <sup>3</sup>
Poisson's Ratio	0,3	0,33	
Tensile Ultimate Strength	40	34,6	MPa

B. Meshing

Proses ini membagi geometri bilah menjadi elemen-elemen kecil untuk perhitungan numerik.

- 1) Menggunakan pengaturan *Program Controlled* yang memungkinkan *software* secara otomatis memilih algoritma pembentukan elemen terbaik yang sesuai dengan topologi geometri bilah.
- 2) Ukuran elemen global (*Element Size*) ditetapkan sebesar 8 mm.
- 3) Pemilihan ukuran 8 mm didasarkan pada hasil uji konvergensi *mesh* (*mesh independence study*). Pada ukuran ini, hasil simulasi (tegangan dan deformasi) telah mencapai nilai yang stabil (konvergen) dan tidak mengalami perubahan signifikan jika ukuran elemen



Gambar 3. Meshing

Table 2. Ukuran Mesh

Ukuran Mesh	Deformasi	Tegangan
8 mm	6,27 mm	2,8468
5 mm	6,26 mm	2,99

Konvergensi Mesh

C. Boundary Condition and Load

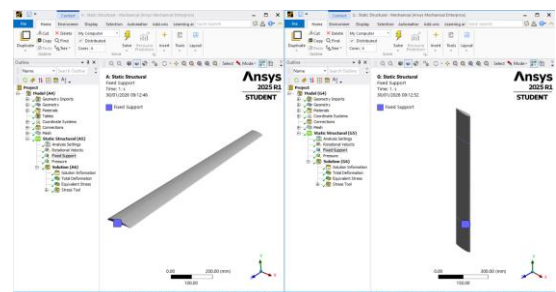
Kondisi batas didefinisikan untuk merepresentasikan tumpuan struktur (*support*) agar model statis dan tidak bergerak bebas.

1. HAWT

Diberikan kondisi *Fixed Support* pada seluruh permukaan penampang pangkal bilah (*Root Face*), merepresentasikan sambungan kaku ke *hub* rotor.

2. VAWT

Diberikan kondisi *Fixed Support* pada dua area spesifik di permukaan dalam bilah, yaitu pada posisi 20% dan 80% dari panjang bentang. Area ini merepresentasikan titik sambungan dengan lengan penyangga (*strut*).



Gambar 4. Boundary Condition

D. Pembebanan

Pembebanan yang dilakukan Adalah kecepatan rotasi dan tekanan aerodinamika, pada setiap sumbu bilah dan setiap material dan variasi kecepatan angin yang berbeda.

Table 3. Pembebanan

Radius (m)	P 12 m/s (Pa)	P 25 m/s (Pa)	P 50 m/s (Pa)
0,1	155,27	597,19	2319,84
0,2	224,18	666,09	2388,75
0,3	339,02	780,94	2503,59
0,4	499,80	941,72	2664,38
0,5	706,52	1148,44	2871,09
0,6	959,18	1401,09	3123,75
0,7	1257,77	1699,69	3422,34
0,8	1602,30	2044,22	3766,88
0,9	1992,77	2434,69	4157,34
1	2429,18	2871,09	4593,75

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi

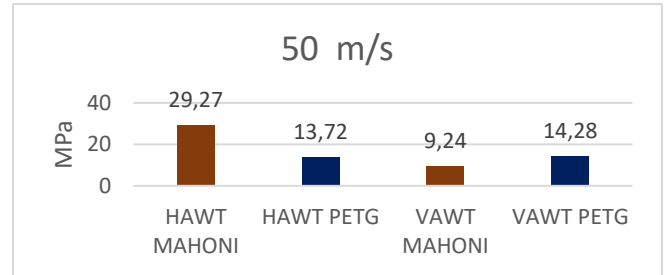
Penelitian ini mensimulasikan respons struktur dari dua jenis turbin angin (HAWT dan VAWT) dengan variasi material (Kayu Mahoni dan PETG) pada tiga kondisi kecepatan angin yang berbeda: 12 m/s (*wind rated speed*), 25 m/s (*cut-out speed*), dan 50 m/s (badai ekstrem). Parameter utama yang dievaluasi meliputi Deformasi Total (*Total Deformation*), Tegangan Ekuivalen (*Von-Mises Stress*), dan Faktor Keamanan (*Safety Factor*).

Table 4 Hasil Simulasi

Desa in Bilah	Materi	Kecepatan Angin (m/s)	Deformasi Total (mm)	Tegangan Von-Mises (MPa)	Safety Factor (SF)
HAWT	Mahoni	12	6,27	2,85	14,05
		25	27,03	7,80	5,13
		50	108,09	29,27	1,37
HAWT	PETG	12	8,29	4,27	8,10
		25	27,29	5,76	6,00
		50	110,74	13,72	2,52
VAWT	Mahoni	12	0,82	7,05	5,67
		25	0,89	7,63	5,24
		50	1,09	9,24	4,32
VAWT	PETG	12	7,29	14,28	2,42
		25	7,56	14,82	2,34
		50	8,29	16,27	2,13

Tabel diatas menunjukkan hasil simulasi statis dari dua konfigurasi sumbu bilah yaitu bilah sumbu horizontal dan sumbu vertical, memuat hasil nilai Tegangan Von-Misses, Deformasi, dan *Safety Factor* dengan pembagian variasi kecepatan angin yaitu 12, 25, 50 m/s.

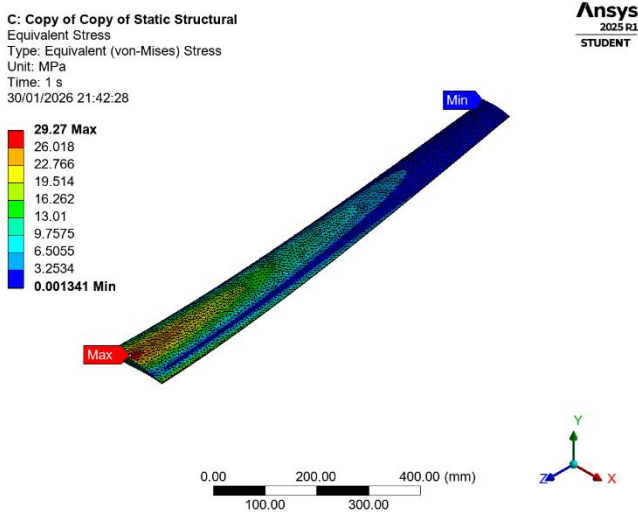
B. Analisis Distribusi Tegangan



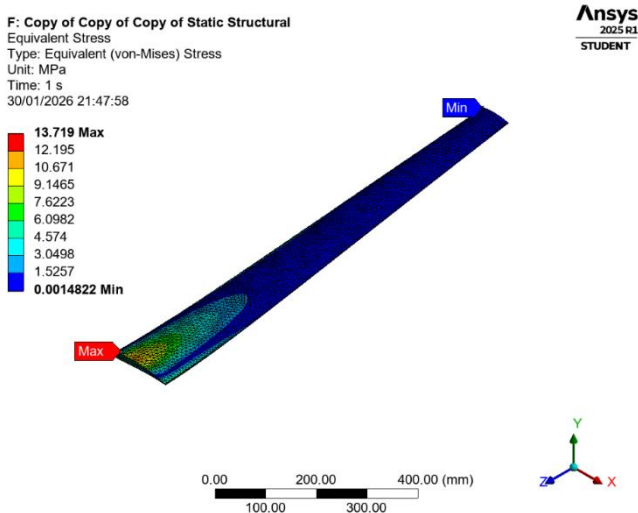
Grafik 1. Tegangan Pada 50 m/s

Berdasarkan grafik tersebut, dapat dianalisis beberapa fenomena kekuatan struktur:

1. Dominasi Gaya Sentrifugal pada Material PETG Secara konsisten, material PETG menghasilkan tegangan dasar yang lebih tinggi dibandingkan Kayu Mahoni pada kondisi VAWT (14-16 MPa vs 7-9 MPa). Hal ini disebabkan oleh densitas massa PETG ( $1.270 \text{ kg/m}^3$ ) yang dua kali lipat lebih berat daripada Kayu Mahoni ( $610 \text{ kg/m}^3$ ). Sesuai hukum Newton II untuk gerak rotasi ( $F_c = m\omega^2 r$ ), massa yang lebih besar menghasilkan gaya inersia sentrifugal yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan tegangan tarik internal di sepanjang bilah.
2. Terdapat fenomena menarik pada desain HAWT saat kondisi badai (50 m/s). Tegangan pada bilah Kayu melonjak drastis hingga 29,27 MPa, sementara pada bilah PETG hanya mencapai 13,72 MPa. Analisis: Hal ini terjadi akibat karakteristik modulus elastisitas PETG yang rendah (2 GPa). Saat terbebani angin ekstrem, bilah PETG mengalami defleksi yang sangat besar (>100 mm) dan melengkung mengikuti arah angin (*blade flexing*). Perubahan geometri ini secara aerodinamis mengurangi luas penampang efektif yang menabrak angin, sehingga beban momen lentur yang diterima justru berkurang. Sebaliknya, bilah kayu yang kaku (10 GPa) menahan beban angin secara penuh, mengakibatkan konsentrasi tegangan tinggi di akar bilah.



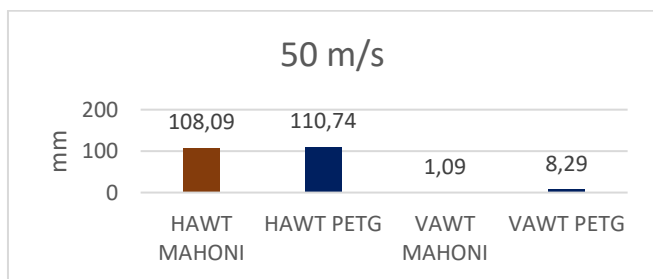
Gambar 5. Kontur tegangan pada HAWT Mahoni



Gambar 6. Kontur tegangan pada HAWT PETG

C. Analisis Deformasi Total

Deformasi total menunjukkan seberapa jauh elemen bilah berpindah dari posisi aslinya, yang merepresentasikan kekakuan (*stiffness*) sistem struktur.

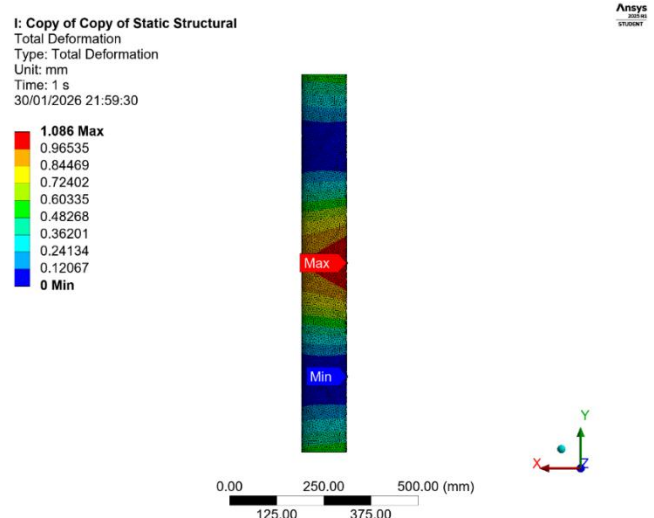


Grafik 2. Deformasi Pada 50 m/s

1. Pengaruh Konfigurasi Tumpuan (*HAWT* vs *VAWT*) Perbedaan paling mencolok terlihat antara desain *HAWT* dan *VAWT*:

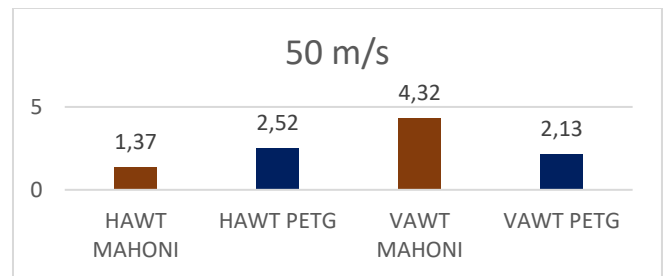
- a. *HAWT* (Kantilever): Mengalami deformasi ekstrem, mencapai 110,74 mm pada *PETG* 50 m/s. Karena hanya ditumpu pada satu ujung (akar), momen lentur bekerja maksimum di sepanjang lengan momen 1 meter, menyebabkan ujung bilah melengkung bebas.
- b. *VAWT* (Fixed-Fixed): Deformasi sangat minim dan stabil, hanya berkisar 0,8 - 8,3 mm. Tumpuan ganda pada lengan atas dan bawah memberikan kekakuan struktural yang jauh lebih tinggi, membatasi pergerakan bilah meskipun menggunakan material yang fleksibel.

Kinerja Material pada *VAWT* Pada desain *VAWT*, deformasi bilah *PETG* (~7-8 mm) tercatat lebih besar dibandingkan Kayu (~1 mm). Meskipun demikian, deformasi sebesar 8 mm pada bentang 1 m (rasio 0,8 %) masih sangat aman dan berada dalam batas toleransi operasional



Gambar 7. Kontur Deformasi pada VAWT Mahoni

D. Analisis Faktor Keamanan



Grafik 3. Factor of Safety Pada 50 m/s

1. Hasil simulasi membuktikan bahwa material *PETG* layak dan aman digunakan.
  - a. Pada kondisi paling ekstrem (50 m/s), *PETG* masih mempertahankan *Safety Factor* sebesar 2,52 (*HAWT*) dan 2,13 (*VAWT*).

- b. Nilai ini berada di atas ambang batas kritis ( $SF = 1$ ) dan memenuhi standar keamanan rekayasa umum ( $SF \geq 1,5$ )

2. Perhatian khusus harus diberikan pada *HAWT* Kayu di kecepatan 50 m/s, di mana nilai SF turun drastis menjadi 1,37. Meskipun secara teknis belum gagal, nilai ini mendekati batas risiko. Sifat kayu yang kaku dan getas (*brittle*) membuatnya kurang mampu meredam lonjakan beban badai dibandingkan *PETG* yang fleksibel.

E. Validasi Hasil Simulasi

Untuk memastikan kebenaran hasil simulasi numerik, dilakukan verifikasi analitis sederhana menggunakan prinsip fisika dasar.

1. Validasi Linearitas Beban Angin

Secara teoretis, gaya aerodinamika berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan angin. Maka, pada struktur linear seperti Kayu Mahoni di rentang deformasi kecil, deformasi juga harus mengikuti tren kuadratik tersebut.

Table 5. Validasi Hasil

Variabel Validasi	Kondisi Awal (1)	Kondisi Uji (2)	Rumus Rasio	Nilai Rasio
Kecepatan Angin (v)	12 m/s	25 m/s	$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2$	4,34 (Teoritis)
Deformasi Total (δ)	6,27 mm	27,03 mm	$\frac{\delta_2}{\delta_1}$	4,31 (Simulasi)
Deviasi (error)	-	-	-	Selisih teori dan simulasi, 0,7 %

2. Validasi Efek Sentrifugal

Pada material *PETG*, deformasi tidak melonjak linear sesuai penurunan modulus elastisitas (1/5 dari kayu) karena adanya efek putaran. Gaya sentrifugal yang tinggi pada *PETG* (akibat massa jenis tinggi) memberikan efek "tarikan" (*tension*) yang meningkatkan kekakuan efektif bilah (*geometric stiffness*). Hal ini menjelaskan mengapa deformasi *PETG* pada simulasi (8,29 mm) jauh lebih kecil dari prediksi statik murni tanpa putaran, yang memvalidasi bahwa pengaturan *Rotational Velocity* dan *Large Deflection* pada simulasi telah berfungsi dengan benar.

F. Komparasi Desain

Berdasarkan seluruh parameter yang diuji, dilakukan perbandingan performa antara kedua desain turbin ketika menggunakan material *PETG*:

Table 6. Komparasi

Parameter Evaluasi	<i>HAWT</i> (SG6043 Tapered)	<i>VAWT</i> (NACA 0018 H-Darrieus)	Keterangan
Nilai Defleksi	Sangat Rendah (Defleksi > 100 mm)	Sangat Tinggi (Defleksi < 9 mm)	<i>VAWT</i> lebih stabil dimensinya.
Distribusi Tegangan	Terpusat di Akar (Konsentrasi Tinggi)	Merata (Terdistribusi sepanjang bilah)	<i>VAWT</i> lebih efisien membagi beban.
Respons Badai	Tegangan turun karena <i>flexing</i> (Positif)	Tegangan naik linear namun stabil	<i>HAWT</i> unggul dalam <i>load shedding</i> pasif.
Faktor Keamanan	2,52 (Tinggi)	2,13 (Cukup Tinggi)	Keduanya Aman.

Meskipun *HAWT* menunjukkan kemampuan adaptasi yang baik terhadap badai melalui fleksibilitasnya, desain *VAWT* H-Darrieus dinilai lebih unggul secara struktural untuk aplikasi material *PETG*. Kekakuan tinggi yang dimiliki *VAWT* (berkat tumpuan ganda) sangat krusial untuk mencegah masalah getaran (*flutter*) dan menjaga efisiensi aerodinamika yang konsisten, menjadikannya pilihan desain yang lebih kokoh untuk fabrikasi skala kecil.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis perbandingan kekuatan bilah turbin angin horizontal (*HAWT* dengan *airfoil* SG6043 *untwisted*) dan vertikal (*VAWT* dengan *airfoil* NACA 0018) menggunakan metode elemen hingga pada material kayu mahoni dan *PETG*, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Distribusi tegangan Von-Mises dan deformasi total pada bilah *HAWT* lebih tinggi dibandingkan *VAWT* akibat pembebanan aerodinamika dan sentrifugal, terutama pada kecepatan angin ekstrem (50 m/s). Tegangan maksimum pada *HAWT* mencapai 29,27 MPa untuk kayu mahoni, sementara *VAWT* lebih stabil di bawah 16 MPa untuk *PETG*, dengan konsentrasi tegangan utama di akar bilah untuk *HAWT* dan di tengah bilah untuk *VAWT*.

2. Material *PETG* menunjukkan kekuatan struktural yang lebih baik dibandingkan kayu mahoni pada kondisi badai, dengan tegangan lebih rendah (13,72 MPa vs 29,27 MPa pada *HAWT* 50 m/s) berkat fleksibilitasnya yang mengurangi beban efektif melalui deformasi adaptif. Namun, kayu mahoni lebih kaku pada kondisi normal, dengan deformasi minimal (kurang dari 1 mm pada *VAWT*).
3. Desain *VAWT* dengan tumpuan dua sisi (*fixed-fixed*) memiliki kekakuan struktural yang superior dibandingkan *HAWT (cantilever)*, terbukti dari deformasi maksimum *VAWT* hanya 8,29 mm pada *PETG* 50 m/s, dibandingkan 110,74 mm pada *HAWT*. Hal ini menjadikan *VAWT* lebih cocok untuk material polimer seperti *PETG* pada aplikasi skala kecil, dengan faktor keamanan tetap di atas 2,0 pada semua skenario.

## REFERENCES

- [1] Tiju, "Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus PE configurations", *Renewable Energy*, 75, pp. 50-67, 2015
- [2] Ackermann.T, 'An overview of wind energy-status 2002', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1-2), pp. 67-127.
- [3] Cook, Malkus, Witt, "*Concepts and applications of finite element analysis*". 4th edn. New York: John Wiley & Sons.
- [4] Green. D, "Strain energy in mechanics of materials", 2019
- [5] Manwell, J.F, "*Wind energy explained: theory, design and application*". 2nd edn. Chichester: John Wiley & Son, 2019
- [6] The Wood Database (2025) 'Mahogany Mixups: the Lowdown'. Available at: <https://www.wood-database.com/wood-articles/mahogany-mixups-the-lowdown/>
- [7] Dzonzi. U, "Material extrusion additive manufacturing of PETG: Impact of fusion between layers on part performance", *Journal of Manufacturing Processes*, 110, pp. 139-151.