

## Performa dan Kekuatan Bilah Turbin Angin Berbahan Kayu pada Kecepatan Angin Sumbawa

Fadhli Dzil Ikram<sup>1</sup>, Muhammad Hamzah Al-Qowiy<sup>2</sup>

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Teknologi Sumbawa, Indonesia

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 10 September 2024

Revised: 28 September 2024

Accepted: 10 November 2024

#### Keywords:

Bilah turbin angin kayu

Teori blade element momentum

Metode elemen hingga

Koefisien daya

Kayu jati

Kayu mahoni

#### Published by

Impression : Jurnal Teknologi dan Informasi

Copyright © 2023 by the Author(s) | This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



### ABSTRACT

Penelitian ini mengkaji performa aerodinamika dan kekuatan struktur bilah turbin angin yang terbuat dari kayu lokal pada kondisi angin wilayah Sumbawa, Indonesia. Pendekatan numerik digunakan dengan menerapkan Teori Blade Element Momentum (BEMT) untuk analisis aerodinamika dan Metode Elemen Hingga (FEM) untuk simulasi struktur. Airfoil S826 dipilih karena memiliki rasio gaya angkat terhadap gaya hambat ( $C_l/C_d$ ) yang unggul. Bilah yang dirancang dievaluasi melalui simulasi menggunakan perangkat lunak QBlade dan SolidWorks. Hasil menunjukkan bahwa bilah mampu mencapai koefisien daya ( $C_p$ ) maksimum sebesar 48% pada Tip Speed Ratio (TSR) 6-7, dengan daya keluaran maksimum 1287,5 W pada kecepatan putar 324,7 rpm. Analisis struktur menunjukkan bahwa kayu jati memiliki tegangan dan deformasi yang lebih rendah (12,41 MPa dan 29,34 mm) dibandingkan kayu mahoni (54,06 MPa dan 61,27 mm), sehingga kayu jati lebih cocok digunakan sebagai bahan bilah. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan kayu jati sebagai alternatif bahan bilah turbin angin skala kecil yang efektif dari segi biaya dan layak secara struktural di wilayah tropis terpencil.

This study investigates the aerodynamic performance and structural strength of wind turbine blades made from locally available wood under wind conditions typical of Sumbawa, Indonesia. The research employs a numerical approach using the Blade Element Momentum Theory (BEMT) for aerodynamic analysis and the Finite Element Method (FEM) for structural simulation. The S826 airfoil was selected based on its superior lift-to-drag ratio. The designed blades were evaluated through simulations using QBlade and SolidWorks software. The results showed that the blades could achieve a maximum power coefficient ( $C_p$ ) of 48% at a Tip Speed Ratio (TSR) of 6-7, with a maximum output of 1287.5 W at 324.7 rpm. Structural analysis revealed that teak wood exhibited lower stress and deformation (12.41 MPa and 29.34 mm, respectively) compared to mahogany (54.06 MPa and 61.27 mm), indicating that teak is more suitable for blade construction. This research recommends the use of teak wood as a cost-effective and structurally viable alternative for small-scale wind turbines in remote tropical regions.

#### Corresponding Author:

Fadhli Dzil Ikram

Program Studi Teknik Mesin Fakultas Rekayasa Sistem, Universitas Teknologi Sumbawa, Indonesia

Jl. Raya Olat Maras Batu Alang, Pernek, Kec. Moyo Hulu, Kabupaten Sumbawa, NTB, 84371, Indonesia

Email: [fadhli.dzil.ikram@uts.ac.id](mailto:fadhli.dzil.ikram@uts.ac.id)

## PENDAHULUAN

Tantangan global yang dihadapi dunia saat ini yaitu berupa peningkatan konsumsi energi seiring dengan pertumbuhan populasi dan aktivitas industri yang kian masif (Ghasemian et al., 2024; Onwe et al., 2024; Vo & Vo, 2021). Ketergantungan pada sumber energi fosil tidak hanya menimbulkan kekhawatiran akan ketersediaannya di masa depan, tetapi juga berdampak pada kerusakan lingkungan (Bach, 1981;

Höök & Tang, 2013; Mayer, 2022). Oleh karena itu, pemanfaatan sumber energi terbarukan menjadi salah satu alternatif yang sangat relevan dalam upaya menciptakan sistem energi yang berkelanjutan

Energi angin merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang memiliki potensi besar dan dapat dimanfaatkan secara lokal. Salah satu perangkat utama dalam konversi energi angin menjadi energi listrik adalah turbin angin, khususnya jenis turbin angin sumbu horizontal (HAWT), yang banyak digunakan karena efisiensinya. Pemanfaatan turbin angin skala kecil sangat menjanjikan bagi daerah-daerah terpencil di Indonesia, termasuk wilayah timur seperti Pulau Sumbawa.

Secara geografis, Sumbawa memiliki bentang alam yang relatif terbuka dan didominasi oleh dataran tinggi serta pesisir yang memungkinkan aliran angin relatif stabil. Berdasarkan data dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Sumbawa Besar, rata-rata kecepatan angin maksimum pada enam bulan terakhir di wilayah ini sebesar 8,5 m/s. Kondisi ini menunjukkan potensi besar untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin skala kecil hingga menengah. Rata-rata musiman menunjukkan bahwa kecepatan angin cenderung lebih tinggi pada periode April–Oktober (musim kemarau), dengan rata-rata mencapai 9,2 m/s, dan menurun pada periode November–Maret (musim hujan) hingga 7,4 m/s (BMKG, 2022).

Salah satu tantangan dalam pengembangan turbin angin di daerah adalah pemilihan material untuk komponen utama seperti bilah. Material konvensional seperti fiberglass atau karbon memiliki harga yang tinggi dan proses pembuatannya membutuhkan teknologi yang tidak selalu tersedia di daerah. Dalam konteks ini, pemanfaatan kayu sebagai material alternatif menjadi menarik untuk diteliti. Kayu memiliki keunggulan dari segi ketersediaan lokal, biaya rendah, dan kemudahan pengolahan, namun perlu dikaji lebih lanjut terkait kekuatannya terhadap beban aerodinamika akibat kecepatan angin. Pendekatan numerik yang digunakan dalam penelitian ini melibatkan metode Blade Element Momentum Theory (BEMT) untuk simulasi aerodinamika, dan Finite Element Analysis (FEA) menggunakan perangkat lunak SolidWorks untuk analisis kekuatan struktur bilah.

Sejumlah penelitian telah membahas penggunaan kayu untuk bilah turbin angin, baik dari segi eksperimental maupun pendekatan numerik seperti yang dilakukan oleh (Raisyah, 2021) mengenai analisis ketahanan kayu lunak dan kayu keras terhadap kecepatan putar rotor untuk material bilah turbin angin skala mikro. Selain itu ada juga riset yang dilakukan oleh (Dirgantini, 2021) tentang simulasi kekuatan struktur kayu pinus terhadap pembebanan pada turbin angin sumbu horizontal skala mikro. Namun, belum banyak studi yang secara khusus mengintegrasikan aspek performa aerodinamika dan kekuatan struktur material kayu berdasarkan karakteristik kecepatan angin di wilayah tropis seperti Sumbawa. Oleh karena itu, riset ini dilakukan untuk menganalisis performa bilah turbin angin berbahan kayu secara numerik melalui simulasi aliran udara dan analisis struktur akibat beban angin.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan teknologi energi terbarukan berbasis potensi lokal. Selain itu, hasil studi ini dapat menjadi referensi dalam merancang bilah turbin angin yang lebih terjangkau dan sesuai dengan kondisi angin di daerah-daerah terpencil.

## URAIAN TEORI

### **Teori Blade Element Momentum (BEMT)**

Pendekatan *Blade Element Momentum* (BEMT) merupakan metode analisis yang lazim digunakan dalam studi kinerja aerodinamika turbin angin. Teori ini mengombinasikan konsep pembagian bilah menjadi beberapa elemen kecil dengan prinsip perubahan momentum fluida. Setiap elemen dianalisis untuk menentukan besarnya gaya angkat dan hambat berdasarkan bentuk profil dan kecepatan relatif angin yang mengenainya (Hansen, 2015; Manwell et al., 2017; Bianchi et al., 2018). Pendekatan ini memungkinkan perhitungan efisiensi dan daya turbin secara terperinci, dan sangat sesuai digunakan untuk menilai kemampuan bilah berbahan kayu dalam memanfaatkan angin lokal, seperti di wilayah Sumbawa.

### **Interaksi Aeroelastik**

Aeroelastisitas mengkaji keterkaitan antara gaya-gaya aerodinamika dan perubahan bentuk struktural bilah akibat gaya tersebut. Dalam sistem turbin angin, hembusan angin dapat menyebabkan bilah melengkung atau memelintir, yang kemudian memengaruhi aliran udara di sekitarnya (Schaffarczyk, 2014). Material seperti kayu, yang memiliki elastisitas alami dan karakteristik struktural unik, memerlukan perhatian khusus dalam analisis aeroelastik agar kestabilan dan efisiensi turbin tetap terjaga saat beroperasi.

### Sifat Fisik dan Mekanik Kayu

Kayu dikenal sebagai material yang bersifat anisotropik, yang berarti kekuatannya berbeda tergantung arah seratnya. Selain itu, kayu juga sensitif terhadap perubahan kelembapan dan suhu lingkungan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Forest Products Laboratory (2010), karakteristik mekanik kayu seperti kekuatan tarik, tekan, dan modulus elastisitas bervariasi menurut jenis kayunya. Pemahaman mendalam terhadap sifat ini penting ketika kayu digunakan sebagai material struktural dalam bilah turbin angin, agar kinerjanya tetap optimal dalam jangka panjang.

Kayu jati dan kayu mahoni merupakan dua jenis kayu yang digunakan pada penelitian ini. Berdasarkan data dari material web (MatWeb, 2024a, 2024b) dan penelitian oleh (Ramadhan, 2024) kayu jati memiliki *tensile strength* sekitar 118 MPa dan Poisson's ratio sebesar 1,183, sedangkan kayu mahoni memiliki *tensile strength* 60 MPa dan Poisson's ratio sekitar 0,032.

### Simulasi dengan Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (FEM) merupakan alat bantu simulasi numerik yang sering digunakan untuk mengevaluasi tegangan, deformasi, dan distribusi gaya dalam suatu struktur. Dalam penelitian ini, FEM digunakan untuk memodelkan bilah turbin berbahan kayu dalam berbagai kondisi beban angin. Metode ini memungkinkan peneliti mengidentifikasi potensi titik lemah struktur dan memperkirakan respons kayu terhadap tekanan angin dengan lebih akurat (Bathe, 2021; Cook et al., 2019; Zienkiewicz et al., 2013). Dengan demikian, hasil simulasi dapat digunakan untuk memperkuat desain dan memperkirakan umur pakai bilah.

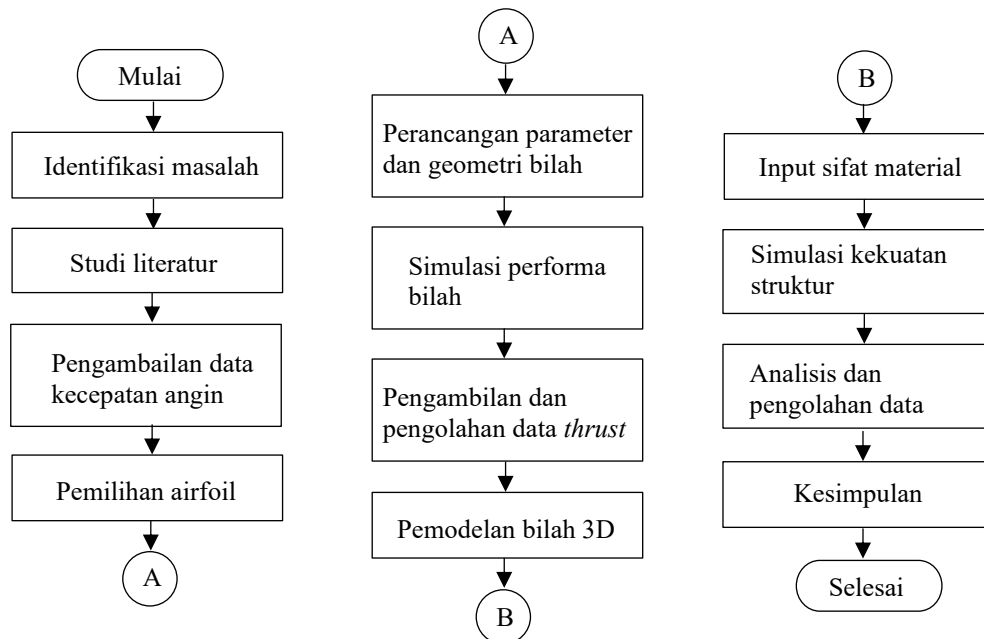
## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan sistematis sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1. Tahap awal dimulai dengan identifikasi masalah yang berkaitan dengan efisiensi dan kekuatan material kayu pada bilah turbin angin horizontal. Setelah itu dilakukan studi literatur untuk memperoleh dasar teori yang relevan, termasuk karakteristik turbin angin, material kayu, dan parameter desain bilah.

Langkah selanjutnya adalah pengumpulan data kecepatan angin di wilayah Sumbawa, yang menjadi acuan utama dalam perancangan bilah. Data ini kemudian digunakan dalam proses pemilihan airfoil yang sesuai dengan kondisi angin lokal. Setelah itu, dilakukan perancangan geometri bilah menggunakan parameter yang diperoleh dari hasil perhitungan teoritis dan referensi literatur. Bilah dirancang dalam bentuk tiga dimensi untuk keperluan simulasi selanjutnya.

Simulasi performa bilah dilakukan menggunakan perangkat lunak untuk memperoleh data gaya dorong (*thrust*) yang dihasilkan dari berbagai kondisi kecepatan angin. Data *thrust* ini kemudian diolah dan digunakan sebagai beban dalam simulasi kekuatan struktur bilah menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga (FEM).

Pada tahap akhir, sifat mekanik material kayu dimasukkan sebagai input dalam simulasi struktur. Hasil simulasi dianalisis untuk menilai distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan bilah. Berdasarkan hasil analisis tersebut, dibuat kesimpulan mengenai kelayakan kayu sebagai material bilah turbin angin untuk wilayah dengan kondisi angin seperti di Sumbawa.



Gambar 1 Flowchart riset

### Uji Karakteristik Airfoil

Pemilihan *airfoil* dengan kinerja yang optimal biasanya ditandai dengan tingginya nilai  $Cl/Cd$  terhadap  $\alpha$  dan nilai  $Cl$  terhadap  $\alpha$  (Pahlawan, 2021). Dalam penelitian ini, untuk menentukan *airfoil* yang akan digunakan, dilakukan perbandingan beberapa *airfoil* yang sebelumnya telah digunakan dalam desain bilah, antara lain adalah NACA 4412, NACA 4418, S826 dan S2091.

### Perancangan Bilah/Blade

Perencanaan ini dimulai dengan menentukan daya maksimum yang dihasilkan oleh turbin angin. Untuk generator yang digunakan, adalah digunakan *The Sky Dancer* (TSD) dengan kapasitas daya maksimum sebesar 500 Watt. Berikut perhitungan yang dilakukan pada perancangan parameter bilah:

### Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem menjadi faktor utama dalam merancang bilah turbin angin. Persamaan yang digunakan untuk menghitung efisiensi sistem ( $K$ ) turbin angin sebagai berikut]:

$$K = \eta_{bilah} \times \eta_{transmisi} \times \eta_{controller} \quad (1)$$

### Daya Angin

Untuk mencapai daya listrik sebesar 500-Watt dengan memperhatikan efisiensi sistem yang telah diketahui, dapat digunakan persamaan:

$$P_a = \frac{P_{el}}{K} \quad (2)$$

Dimana:

$P_a$  = Daya Angin (W)

$P_{el}$  = Daya listrik (W)

$K$  = Efisiensi sistem (%)

### Luas Sapuan Bilah

Luas sapuan adalah daerah yang dilalui oleh angin dan memberikan dorongan pada bilah. Untuk menghitung luas sapuan, dapat digunakan persamaan berikut:

$$A = \frac{2P_a}{\rho v_{max}^3} \quad (3)$$

Dimana:

$A$	= Luas sapuan ( $m^2$ )
$P_a$	= Daya angin (W)
$\rho$	= Densitas angin ( $kg/m^3$ )
$v$	= kecepatan angin ( $m/s$ )

### Jari-Jari Bilah

Jari-jari bilah dapat ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (4)$$

Dimana:

$R$	= Jari-jari (m)
$A$	= Luas sapuan ( $m^2$ )

### Perancangan Geometri Bilah/Blade

Dalam perancangan geometri bilah, diperlukan penentuan jumlah elemen pada bilah. Pembagian elemen ini dilakukan untuk mempermudah dan mengakuratkan pada tahap perancangan geometri pada bilah, dalam perancangan bilah umumnya dilakukan pembagian elemen dengan jumlah berkisar antara 10 hingga 20 elemen. Berikut perhitungan yang dilakukan pada proses perancangan geometri bilah:

### Jari-Jari Parsial

menentukan jari-jari parsial dengan membagi bilah menjadi 10 elemen yang bertujuan untuk menghitung keakuratan dalam perancangan. Untuk menghitung jari-jari parsial dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$r = \text{innermost station} + \left[ \left( \frac{R - \text{innermost station}}{n} \right) x (\text{elemen}) \right] \quad (5)$$

Dimana:

$r$	= Jari-jari parsial (m)
$n$	= Jumlah elemen

### TSR Parsial

TSR parsial adalah sebuah perbandingan antara kecepatan linear dari elemen bilah dengan kecepatan angin pada elemen yang berbeda. Adapun persamaan untuk TSR parsial adalah:

$$\lambda_r = \frac{r}{R} \times \lambda \quad (6)$$

Dimana:

$\lambda_r$	= TSR parsial
$\lambda$	= TSR

### Koefisien Lift

Koefisien *Lift* adalah gaya resultan yang tegak lurus terhadap arah kecepatan hulu. Berikut persamaan yang dapat menentukan berapa nilai koefisien *lift* untuk setiap elemen bilah:

$$Cl = \frac{16\pi \times R \times \left(\frac{R}{r}\right)}{9\lambda \times B \times Cr} \quad (7)$$

Dimana:

$Cl$	= Coefisient lift
$B$	= Jumlah bilah
$Cr$	= Chord

### Sudut Aerodinamis Pada Penampang Airfoil

Beberapa sudut aerodinamis yang terdapat pada penampang *airfoil* meliputi *flow angle* ( $\phi$ ), *angle of attack* ( $\alpha$ ), *twist* ( $\beta$ ), dan *stall*. Sudut-sudut tersebut merupakan faktor utama yang mempengaruhi gaya aerodinamis pada bilah, namun desain juga harus mempertimbangkan pengaruh turbulensi. Daya angkat atau *lift* adalah gaya aerodinamis yang bekerja tegak lurus terhadap arah angin. Gaya hambat atau *drag*

adalah gaya aerodinamis yang menghambat pergerakan maju *airfoil*. Selain itu, *stall* adalah kondisi di mana *airfoil* kehilangan gaya angkatnya akibat perubahan sudut serang atau *angle of attack*.

*Flow angle* dapat dihitung untuk memprediksi faktor interferensi pada penampang *airfoil*. Sudut *flow angle* pada penampang *airfoil* dapat ditemukan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (8)$$

Dimana:

$\lambda_r$  = Tip Speed Ratio parsial pada elemen yang ingin dicari  
 $\phi$  = Flow angle (°)

*Setting angle* atau *twist* ( $\beta$ ) adalah sudut antara garis *chord* (garis yang menghubungkan *leading edge* dan *trailing edge*) dengan bidang rotasi dari motor pada bilah turbin angin. Untuk mendapatkan nilai dari *twist* ini, dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\beta = \phi - \alpha \quad (9)$$

Dimana:

$\beta$  = sudut puntir / *twist* (°)  
 $\phi$  = Flow angle (°)  
 $\alpha$  = *angle of attack* (°)

Setelah tahap tersebut, dilakukan proses linearisasi *twist* untuk menghasilkan geometri bilah yang lebih teratur. Linearisasi *twist* dilakukan pada 75% panjang bilah atau pada elemen ke-7 dan ke-8 guna mencapai geometri bilah yang lebih teratur. Metode linearisasi *twist* memberikan performa yang optimal pada desain bilah. Proses linearisasi ini dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel*.

### Pemodelan Bilah 3D dan Simulasi Performa Bilah pada Software Qblade

Pada tahap ini, dilakukan pemodelan bilah dengan memasukkan nilai jari-jari parsial ( $r$ ), *twist* yang sudah dilinearisasi, dan juga nilai *Chord* ( $Cr$ ). Selanjutnya, dilakukan simulasi rotor menggunakan metode *Blade Element Momentum* (BEM) untuk menghasilkan grafik pengaruh *Coefficient of Performance* terhadap Tip Speed Ratio ( $C_p$  - TSR) [28], serta grafik daya yang dihasilkan terhadap kecepatan putar ( $P$ -rpm) dan grafik *thrust* terhadap kecepatan putar (rpm) untuk mendapatkan nilai pembebanan. Diharapkan pada TSR 7 dan kecepatan angin, bilah menghasilkan daya  $P \geq 500$  Watt. pada nilai pembebanan yang dihasilkan akan dibagi tiga dikarenakan pemodelan bilah yang dirancang pada *SolidWorks* untuk simulasi kekuatan material hanya satu buah bilah.

### Pemodelan Bilah 3D pada Software SolidWorks

Pada proses pembuatan desain 3D bilah menggunakan *software* berbasis CAD, maka perlu ditentukan terlebih dahulu parameter-parameter yang akan digunakan seperti koordinat *airfoil*, nilai *twist* ( $\beta$ ) (sudut puntir), *scale*, dan juga nilai *chord* untuk setiap elemen. Parameter-parameter ini dapat ditentukan melalui perhitungan dengan menggunakan *Microsoft Excel*. Pada tahap perancangan bilah menggunakan *software Q-Blade* lebar *chord* untuk semua elemen masih seragam, akan tetapi karena perbedaan sudut puntir tiap elemen membuat lebar *chord* menjadi berbeda-beda. Sehingga nilai *chord* yang akan di input harus dihitung terlebih dahulu menggunakan rumus berikut:

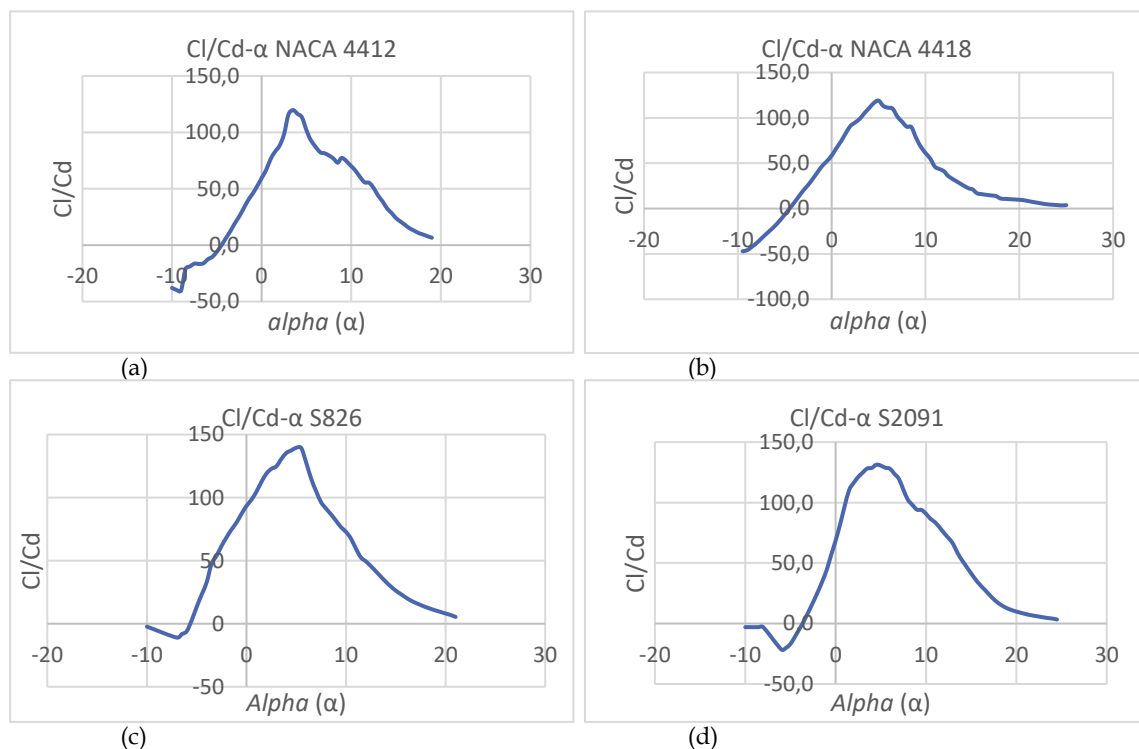
$$z = \frac{x}{\cos \beta} \quad (10)$$

Pada rumus ini  $z$  merupakan nilai *chord* yang digunakan pada *software* dalam meter,  $x$  adalah nilai *chord*, nilai *twist* ( $\beta$ ) yang digunakan juga nilai *twist* ( $\beta$ ) hasil linierisasi sebelumnya. Setelah itu hasil dari perhitungan dikalikan dengan 1000 untuk menghasilkan nilai *chord* dalam satuan milimeter, nilai *chord* ini kemudian dibagi kembali dengan 100 untuk mendapatkan nilai skala yang akan digunakan. Koordinat *airfoil* yang didapatkan dari *Q-Blade* berupa koordinat  $x$  dan  $y$ . Koordinat  $x$  dan  $y$  dikalikan dengan 100 satuan karena proses desain pada *software* berbasis CAD akan menghasilkan desain 3D sehingga ditambahkan koordinat  $z$ . Tuliskan 0 untuk koordinat sumbu  $z$ . Nilai 0 menunjukkan bahwa elemen ini berada pada posisi 0 mm, lalu kurangi koordinat  $z$  dengan jarak antar elemen, pengurangan dilakukan sebanyak jumlah elemen desain yaitu 10 elemen kecuali elemen 0 karena elemen 0 merupakan pangkal bilah.

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### Hasil Uji Karakteristik *Airfoil*

Pada tahap pertama yaitu uji karakteristik *airfoil*, pada proses ini bertujuan untuk membandingkan nilai  $Cl/Cd-\alpha$  pada setiap *airfoil* yang sudah ditentukan antara lain yaitu *airfoil* NACA 4412, NACA 4418, S826 dan S2091. Semakin tinggi nilai  $Cl/Cd-\alpha$  *airfoil* tersebut maka semakin efektif untuk digunakan, dan pada proses ini juga akan menentukan *airfoil* yang akan digunakan ke tahap selanjutnya. Pada gambar 2 tersaji grafik dari nilai perbandingan  $Cl$  dan  $Cd$  terhadap sudut serang ( $Cl/Cd-\alpha$ ) pada *airfoil* NACA 4412, NACA 4418, S826, dan S2091.



Gambar 2. Hasil perbandingan  $Cl$  dan  $Cd$  terhadap  $\alpha$  ( $Cl/Cd-\alpha$ ) gambar (a) *airfoil* NACA 4412, gambar (b) *airfoil* 4418, gambar (c) *airfoil* S826, gambar (d) *airfoil* S2091

Berdasarkan hasil uji karakteristik dari keempat *airfoil* tersebut, *airfoil* yang memiliki nilai  $Cl/Cd-\alpha$  tertinggi diperoleh pada *airfoil* jenis S826 dengan nilai 139.5 pada sudut  $\alpha$  5.1°. Untuk *airfoil* yang memiliki nilai  $Cl/Cd-\alpha$  tertinggi kedua ada pada *airfoil* jenis S2091 dengan nilai 131.3 pada sudut  $\alpha$  4.5° dan untuk *airfoil* jenis NACA 4412 memiliki nilai  $Cl/Cd-\alpha$  sebesar 119.8 pada sudut  $\alpha$  3.5°, sedangkan untuk nilai  $Cl/Cd-\alpha$  terendah ada pada *airfoil* jenis NACA 4418 yaitu sebesar 119.1 pada sudut  $\alpha$  5°. Dari grafik hasil uji karakteristik *airfoil* pada gambar 2 dapat diketahui bahwa nilai  $Cl/Cd-\alpha$  akan menurun ketika mencapai titik maksimum, ini diakibatkan terjadinya stall dimana nilai  $Cl$  telah mencapai maksimum dan tidak bertambah lagi akan tetapi nilai  $Cd$  terus bertambah seiring bertambahnya perubahan pada sudut  $\alpha$  pada *airfoil*. Menimbang dari kelebihan pada *airfoil* jenis S826 yang memiliki nilai  $Cl/Cd-\alpha$  tertinggi, maka *airfoil* ini akan digunakan pada perancangan bilah ditahap selanjutnya.

### Hasil Perancangan Parameter Bilah

Pada tahap perancangan parameter bilah ada beberapa variabel yang ditetapkan, dan ada variabel yang akan dihitung pada *Ms. Excel*. Untuk variabel yang ditetapkan antara lain

kapasitas daya listrik, efisiensi (bilah, transmisi, generator, dan kontroler), kecepatan angin, dan jari-jari yang digunakan. Sedangkan untuk variabel yang dihitung antara lain efisiensi sistem, daya angin, luas sapuan bilah, jari-jari.

Tabel 2. Parameter bilah

Kapasitas daya listrik	efisiensi					Daya angin	Kecepatan angin	Luas sapuan	Jari-jari	Jari-jari digunakan
	Bilah	Transmisi	Generator	Controller	Sistem					
(we)	%	%	%	%	%	Wa	V max	A	R	R
Watt	$\eta$	$\eta$	$\eta$	$\eta$	$\eta$	Watt	m/s	m <sup>2</sup>	m	m
500	0.30	0.9	0.9	0.9	0.22	2286.2	8.5	6.08	1.39	1.50
	0.40				0.29	1714.7		4.56	1.20	

Berdasarkan pada tabel 2 diatas variabel yang ditetapkan adalah *cell* yang berwarna kuning, dan untuk *cell* berwarna putih adalah variabel yang dihitung menggunakan rumus yang sudah ditetapkan.

### Hasil Perancangan Geometri Bilah

Pada tahap perancangan geometri bilah sama seperti pada tahap pencangan parameter bilah, dimana pada tahap ini ada beberapa variabel yang ditetapkan dan ada pula variabel yang dihitung, akan tetapi pada perancangan geometri bilah ada variabel yang di dapat dari hasil simulasi pada *software Qblade*. Untuk variabel yang ditetapkan antara lain adalah elemen bilah, *innermost station*. Sedangkan untuk variabel yang dihitung antara lain adalah jari-jari parsial, TSR parsial, *coefisient lift*, *flow angel*, *twist*, dan *twist linier*. Dan untuk variabel yang di peroleh dari hasil simulasi *software Qblade* antara lain adalah sudut alpha ( $\alpha$ ) / sudut serang.

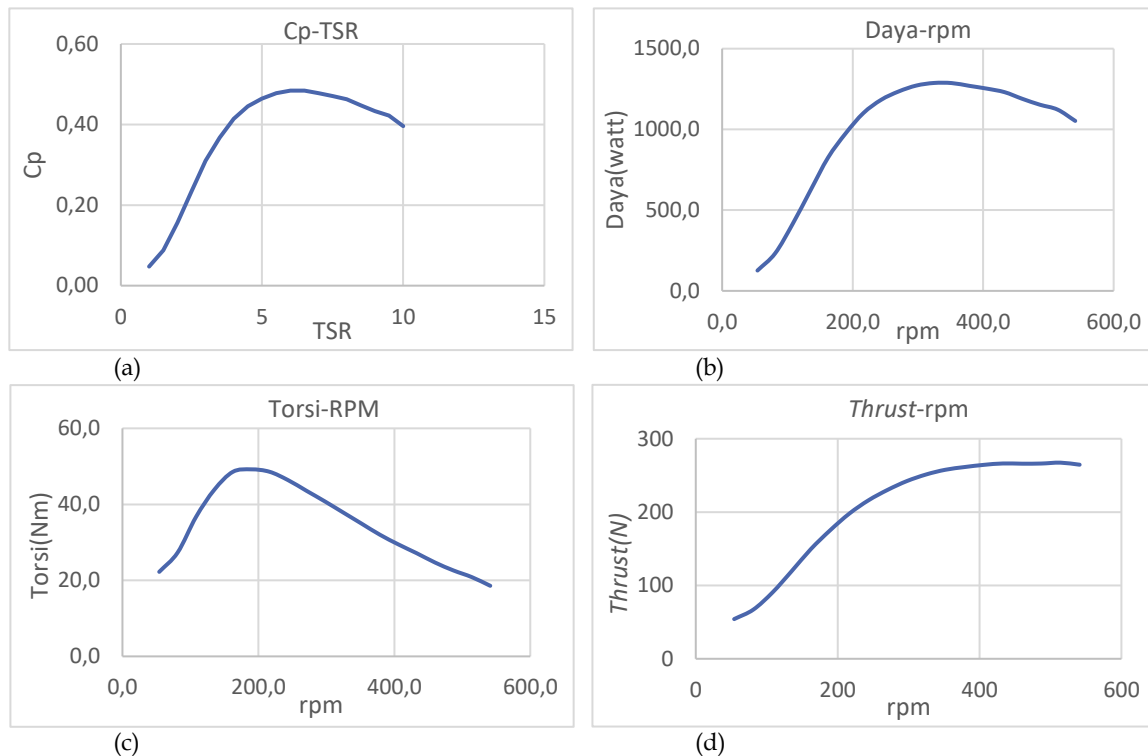
Tabel 3. Geometri bilah

elemen	jari - jari parsial	TSR Parsial	Coefisien lift	Alpha	Flow angle (deg)	Twis (Beta) (deg)	Twis linier 75%	Twis linier 75%
n	r m	$\lambda R$	Cl	a derajat	f derajat	b derajat	b derajat	b derajat
0	0.170	0.79	3.35	0.00	34.38	34.38		10.437
1	0.303	1.41	1.88	0.00	23.51	23.51		10.202
2	0.436	2.03	1.31	5.89	17.45	11.56		9.967
3	0.569	2.66	1.00	2.86	13.76	10.90		9.732
4	0.702	3.28	0.81	1.14	11.32	10.18		9.497
5	0.835	3.90	0.68	-0.02	9.60	9.62		9.262
6	0.968	4.52	0.59	-0.82	8.32	9.14		9.027
7	1.101	5.14	0.52	-1.45	7.34	8.79	8.79	8.792
8	1.234	5.76	0.46	-1.99	6.57	8.56	8.56	8.557
9	1.367	6.38	0.42	-2.35	5.94	8.29		8.322
10	1.500	7.00	0.38	-2.72	5.42	8.14		8.087

### Pemodelan 3D bilah dan Simulasi Performa Bilah pada *Software Qblade*

Dalam pemodelan bilah 3D pada *software Qblade* perlunya penginputan nilai *chord*, jari-jari parsial dan *twist* yang telah di linierisasi. Berikutnya masuk ketahap simulasi performa bilah, pada tahap ini akan mendapatkan nilai dari  $C_p$  terhadap TSR, daya terhadap rpm, torsi terhadap rpm dan nilai *thrust* terhadap rpm dengan menggunakan *airfoil S826*. Berikut adalah hasil dari simulasi performa bilah dengan menggunakan *airfoil S826* seperti pada gambar 3.





**Gambar 3.** Hasil simulasi performa bilah dengan menggunakan airfoil S826, gambar (a) nilai  $C_p$  terhadap TSR, gambar (b) nilai daya terhadap rpm, gambar (c) nilai torsi terhadap rpm dan gambar (d) nilai thrust terhadap rpm.

Dari grafik pada gambar 3 dapat diketahui bahwa nilai  $C_p$  terhadap TSR pada *airfoil* tipe S826 dapat mencapai nilai maksimum ketika nilai TSR 6-7 yaitu sebesar 48%, akan tetapi ketika nilai TSR melebihi itu dapat mengakibatkan nilai pada  $C_p$  menurun. Penurunan tersebut dikarenakan TSR memiliki pengaruh terhadap kecepatan angin, dimana daya angin yang meningkat semakin besar tidak sebanding dengan peningkatan daya poros dan bidang diterima, serta perbandingan daya angin yang diserap bilah lebih kecil dari daya angin yang menerpa bilah tersebut. Maka semakin tinggi kecepatan angin dapat mempengaruhi penurunan pada  $C_p$  tersebut.

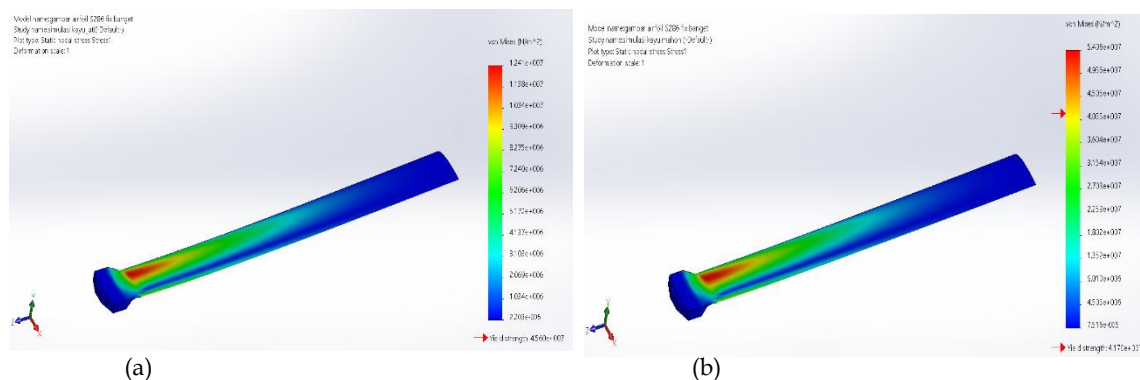
Sedangkan untuk daya yang dihasilkan terhadap rpm diketahui dapat mencapai nilai maksimum ketika rpm mencapai 324.7 yaitu sebesar 1287.5 Watt. Akan tetapi jika rpm melebihi itu dapat menurunkan daya yang dihasilkan. Daya yang dihasilkan generator tidak bisa mengimbangi peningkatan daya secara teoritis karena adanya *loss* energi. Maka, daya listrik yang dihasilkan akan lebih kecil dibandingkan dengan daya teoritis angin. Oleh karena itu, setelah daya mencapai titik maksimum maka daya akan menurun secara perlahan-lahan seiring meningkatnya kecepatan putar.

Dapat diketahui juga berdasarkan grafik pada gambar 3 bahwa torsi yang dibutuhkan untuk mencapai daya maksimum yaitu sebesar 37.9 Nm, dikarenakan untuk mencapai daya maksimum membutuhkan RPM sebesar 324.7, akan tetapi pada RPM 189.4 membutuhkan torsi yang lebih besar yaitu 49.2 Nm. Dari sini dapat diketahui bahwa untuk mencapai daya maksimum tetap membutuhkan torsi maksimum dikarenakan jika RPM lebih tinggi dari 189.4 torsi yang dibutuhkan semakin rendah. Penurunan torsi ini terjadi karena tingginya putaran membuat gaya gesek fluida besar sedangkan gaya yang dibutuhkan bilah turbin angin berputar tetap.

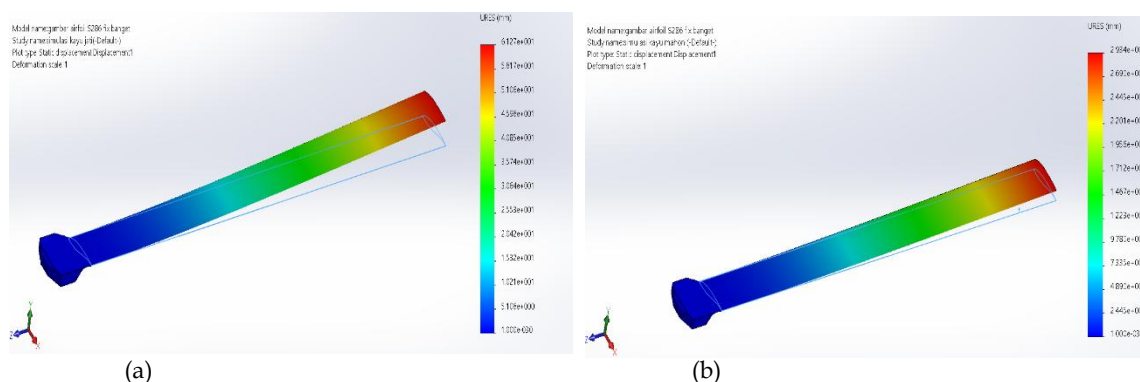
Serta dapat diketahui juga berdasarkan grafik pada gambar 3 bahwa nilai *thrust* terhadap RPM pada *airfoil* tipe S826 mencapai nilai maksimum ketika RPM mencapai 514.1 yaitu sebesar 267.4 N. Dikarenakan simulasi pada *software Qblade* ini menggunakan 3 buah bilah, sedangkan saat simulasi kekuatan material hanya menggunakan 1 buah bilah, maka nilai maksimal dari *thrust* akan dibagi 3 yaitu sebesar 89.1 N.

### Pemodelan 3D dan Simulasi Kekuatan Material Bilah pada *Software SolidWorks*

Dalam pemodelan 3D bilah pada *software SolidWorks* yang pertama dilakukan adalah menginputkan kurva perelemen. Setelah bilah sudah dibentuk menjadi 3D dengan menggunakan fitur *lofted boss/base*, dikarenakan simulasi kekuatan material menggunakan *software* berbasis metode element hingga maka diperlukan pembagian benda kebeberapa bagian atau biasa disebut *meshing*. Berikut hasil *meshing* pada bilah 3D. setelah *meshing* dilakukan selanjutnya yaitu penginputan *material properties* yang sudah disiapkan pada *software SolidWork*. Selanjutnya dilakukan simulasi kekuatan material bilah, hasil dari simulasi kekuatan material bilah menggunakan material kayu jati dan kayu mahoni dengan pembebanan 89.1 N berupa nilai tegangan/*stress* yang tersaji pada gambar 4 dan nilai deformasi/*displacement* dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 4. Hasil simulasi tegangan/stress pada bilah, gambar (a) hasil simulasi tegangan/stress pada bilah menggunakan material kayu jati, gambar (b) hasil simulasi tegangan/stress pada bilah menggunakan material kayu mahoni



Gambar 5. Hasil simulasi deformasi/displacement pada bilah, gambar (a) hasil simulasi deformasi/displacement pada bilah menggunakan material kayu jati, gambar (b) hasil simulasi deformasi/displacement pada bilah menggunakan material kayu mahoni

Berdasarkan dari hasil simulasi tegangan/*stress* pada gambar 4 bilah dengan material kayu jati dan kayu mahoni menunjukkan bahwa nilai maksimum sama-sama berada didekat pangkal bilah dengan nilai *stress* pada bilah dengan material kayu jati  $1,241 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup> atau 12, 41 MPa dan nilai *stress* bilah dengan material kayu mahoni  $5,406 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup> atau 54,06 MPa. Berdasarkan simulasi ini dapat dipastikan bahwa bilah dengan material kayu jati maupun kayu mahoni mampu bertahan pada beban yang diberikan dikarenakan beban maksimum yang dihasilkan tidak melebihi tegangan tarik maksimum material tersebut dengan nilai 60 MPa dan 118 MPa berturut turut pada kayu mahoni dan kayu jati.

Adapun berdasarkan hasil simulasi kekuatan material, bilah dengan kayu jati dan kayu mahoni mengalami deformasi/*displacement* seperti pada gambar 5, dimana bilah dengan kayu jati mengalami deformasi yang cukup besar, berdasarkan hasil simulasi bilah dengan material kayu jati mengalami

deformasi maksimum sebesar 61,27 mm ditunjukkan dengan gradien berwarna merah pada ujung bilah. Sedangkan pada bilah dengan material kayu mahoni mengalami deformasi maksimum lebih kecil daripada bilah dengan material kayu jati yaitu sebesar 29,34 mm. Perlu kita ketahui dengan terjadinya perubahan bentuk pada bilah ini dapat menimbulkan potensi terjadinya defleksi yang kemudian dapat mengakibatkan terjadinya perubahan pada sudut puntir/ *twist*. Hal ini juga berimplikasi pada performa aerodinamika, karena perubahan sudut puntir akibat deformasi dapat menurunkan nilai lift yang dihasilkan, sehingga mengurangi efisiensi konversi daya angin menjadi daya mekanik.

## PENUTUP

Berdasarkan hasil simulasi performa dan analisis kekuatan material bilah turbin angin, dapat disimpulkan bahwa penggunaan airfoil S826 memberikan performa aerodinamika yang optimal dengan nilai  $C_p$  maksimum sebesar 48% pada TSR 6–7. Daya maksimum yang dihasilkan mencapai 1287,5 W pada putaran 324,7 rpm. Secara struktural, kayu jati menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan kayu mahoni karena dari hasil simulasi didapatkan nilai tegangan von Mises pada kayu jati lebih kecil daripada kayu mahoni dengan nilai sebesar 12,41 MPa untuk kayu jati dan 54,06 untuk kayu mahoni. Deformasi maksimum yang terjadi pada kayu mahoni sebesar 61,27 mm sedangkan pada kayu mahoni sebesar 29,34 mm., sehingga lebih layak digunakan sebagai bahan bilah untuk turbin angin skala kecil. Keterbatasan dalam penelitian ini meliputi penggunaan data simulasi numerik tanpa verifikasi eksperimental serta asumsi kecepatan angin konstan yang belum mencerminkan kondisi aktual yang dinamis. Penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan uji eksperimental secara langsung terhadap bilah kayu di laboratorium atau di lapangan, serta mengevaluasi ketahanan material terhadap pengaruh kelembapan, pelapukan, dan beban siklik jangka panjang.

## REFERENSI

- Bach, W. (1981). Fossil fuel resources and their impacts on environment and climate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 6(2), 185–201. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(81\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0360-3199(81)90007-0)
- Bathe, K.-J. (2021). *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe.
- Bianchi, F. D., De Battista, H., & Mantz, R. J. (2018). *Wind turbine control systems: Principles, modelling and gain scheduling design*. Springer.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2019). *Concepts and applications of finite element analysis* (5th ed.). Wiley.
- Dirgantini, D. (2021). *Simulasi kekuatan struktur kayu pinus terhadap pembebanan pada turbin angin sumbu horizontal skala mikro*. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Forest Products Laboratory. (2010). *Wood handbook: Wood as an engineering material* (General Technical Report FPL-GTR-190). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-190>
- Ghasemian, S., Faridzad, A., Abbaszadeh, P., Taklif, A., Ghasemi, A., & Hafezi, R. (2024). An overview of global energy scenarios by 2040: identifying the driving forces using cross-impact analysis method. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(11), 7749–7772. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02738-5>
- Hansen, M. O. L. (2015). *Aerodynamics of wind turbines* (3rd ed.). Routledge
- Höök, M., & Tang, X. (2013). Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change – A review. *Energy Policy*, 52, 797–809. <https://doi.org/10.1016/j.ENPOL.2012.10.046>
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2017). *Wind energy explained: Theory, design and application* (2nd ed.). Wiley.
- MatWeb. (2024a). *Mahogany Wood*. <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=8188e7e1f11b4deb9fd67fe18d83e272>
- MatWeb. (2024b). *Teak Wood*. <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=47a0eaf6bcd64e2f8f6425c872479b6d>

- Mayer, A. (2022). Fossil fuel dependence and energy insecurity. *Energy, Sustainability and Society*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00353-5>
- Onwe, J. C., Ullah, E., Ansari, M. A., Sahoo, M., & Dhayal, K. S. (2024). Industrialization meets sustainability: Analysing the role of technological innovations, energy efficiency and urbanisation for major industrialized economies. *Journal of Environmental Management*, 372, 123297. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.123297>
- Pahlawan, M. R. R. (2021). *STUDI PADA PENGARUH VARIASI CHAMBER DAN THICKNESS TERHADAP AIRFOIL DENGAN DAYA 500 WATT*. Universitas Islam Indonesia.
- Raisiyah, K. A. (2021). *Analisis ketahanan kayu lunak dan kayu keras terhadap kecepatan putar rotor untuk material bilah turbin angin skala mikro*. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Ramadhan, A. Z. (2024). *Analisis Nilai Modulus Of Elasticity (MOE) dan Poisson Ratio Kayu Jati dan Kayu Akasia Berdasarkan ASTM D143-09*. Universitas Sebelas Maret.
- Schaffarczyk, A. P. (2014). *Understanding wind power technology: Theory, deployment and optimisation*. Wiley.
- Vo, D. H., & Vo, A. T. (2021). Renewable energy and population growth for sustainable development in the Southeast Asian countries. *Energy, Sustainability and Society*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00304-6>
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.