

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Muhammad Farenzi Rahmantya

NIM : 1910311056

Program Studi : S1 Teknik Mesin

Dengan ini menyampaikan bahwa judul skripsi “Analisis Kekuatan Bilah Turbin Angin Darrieus H-Rotor Menggunakan Airfoil NACA 0012” benar dan bebas plagiarisme dengan skor 16% Apabila pernyataan ini tidak benar maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku. Demikian surat pernyataan ini dibuat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 1 Agustus 2025

Yang Menyatakan,

Penulis



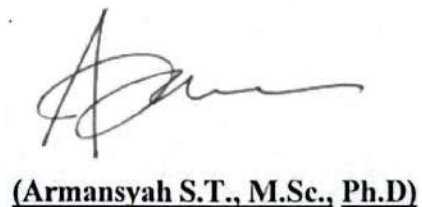
(Muhammad Farenzi Rahmantya)

Pembimbing I



(Sigit Pradana S.T., M.T.)

Pembimbing II



(Armansyah S.T., M.Sc., Ph.D)

ANALISIS KEKUATAN BILAH TURBIN ANGIN DARRIEUS H- ROTOR MENGGUNAKAN AIRFOIL NACA 0012

by Muhammad Farenzi Rahmantya

Submission date: 01-Aug-2025 11:56AM (UTC+0700)

Submission ID: 2723602545

File name: arenzi_1910311056_turnitindocx_-_muhammad_farenzi_rahmantya.docx (5.28M)

Word count: 9015

Character count: 54329

30
**ANALISIS KEKUATAN BILAH TURBIN ANGIN DARRIEUS H-ROTOR
MENGUNAKAN AIRFOIL NACA 0012**

Muhammad Farenzi Rahmantya

ABSTRAK

Bilah memainkan peran utama dan penting bagi turbin, termasuk pada turbin darrieus tipe H-rotor dimana harus dipastikan untuk memperoleh desain yang baik hingga optimal dalam mengeluarkan daya. Maka dari itu, penulis memutuskan memilih penelitian untuk menganalisa tegangan material dan perubahan bentuk di rancangan desain sudu turbin angin pada dua material yang berbeda. Penelitian ini diawali dengan menentukan pemodelan desain satu sampai tiga sudu, kemudian perhitungan gaya yang diterima oleh bilah dan analisa simulasi untuk menentukan material mana yang lebih baik. Metode simulasi yang digunakan hanya struktur statis dengan tiga kecepatan angin, dan daya kapasitas maksimum turbin sebesar 125 W. Setelah simulasi dilakukan pada kedua desain, sudu turbin angin darrieus berbahan alumunium lebih kuat 1.67 kali dibanding desain dengan bahan balsa. Meskipun balsa mempunyai nilai tegangan maksimum yang lebih tinggi, dengan tegangan maksimum sebesar 24,4 MPa dan daya 227,2 W pada angin 8m/s tetapi melebihi tegangan titik luluhnya yang sebesar 20 MPa dan memiliki deformasi yang cenderung besar, yakni sebesar 5,1 mm serta faktor pengaman 0,8.

10
Kata kunci: Turbin angin Darrieus, H-Rotor, Material bilah, Tegangan, Deformasi

30
**ANALISIS KEKUATAN BILAH TURBIN ANGIN DARRIEUS H-ROTOR
MENGUNAKAN AIRFOIL NACA 0012**

Muhammad Farenzi Rahmantya

ABSTRACT

Blade is playing the main and important part roles of the turbine, as well as the darrieus H-rotor type which would be preconcerted to get a good design to be optimal in producing power. Therefore, the author decided to choose the study of material stress analysis and the displacement at the wind turbine blades on two different materials. This study began by determining the design modeling of one blade until three blades, then calculating the forces received by the blade and simulation analysis to determine which material is better. The simulation method used is only a statistical structure with three wind speeds, and a maximum turbine capacity of 125 W. After the simulation was done on both designs, the aluminum darrieus wind turbine blade was 1.67 times stronger than the design with balsa material. Although balsa got higher at stress value, under the maximum stress at 24.4 MPa and a power of 227.2 W at 8m/s wind but exceeds its yield point stress of 20 MPa and has a deformation that tends to be large, which is 5.1 mm and a safety factor of 0.8.

Keywords: Darrieus wind turbine, H-Rotor, Blade material, Stress, Displacement

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan kekhawatiran akan habisnya sumber energi fosil dan potensi bahaya lingkungan yang ditimbulkan oleh penggunaan bahan bakar fosil, energi baru dan terbarukan semakin mendapatkan perhatian. Sumber energi terbarukan dapat berasal dari matahari, air, geotermal, biomassa, dan angin. Energi angin memiliki sumber energi yang fleksibel karena dapat diterapkan di mana saja, di daerah datar, daerah pegunungan, dan di laut. Dengan struktur sederhana, desain kompak, portabel, dan suara yang rendah (Cooper dkk., 2010 & Hirahara dkk. 2005) turbin angin kecil kini menjadi perangkat ekstraksi energi angin yang vital di daerah pedesaan. Turbin angin kecil telah diintegrasikan di atap rumah domestik, pertanian, komunitas terpencil, dan perahu (Ozgener O. & Ozgener L., 2007). Berbeda dengan turbin angin sumbu horizontal (HAWT) yang lebih besar yang terletak di area yang ditentukan oleh kondisi angin yang optimal, turbin angin kecil diharuskan untuk memproduksi daya tanpa harus memiliki kondisi angin terbaik (Faser H. & Gross A., 2011 dan Mayer dkk., 2001)

Turbin angin adalah komponen paling kritis dari pembangkit listrik tenaga angin, dengan biaya yang mencakup 64%-84% dari total biaya pembangkit listrik tenaga angin darat (International Renewable Energy Agency Paper., *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series*; 2012). Selain pertimbangan keuangan, turbin angin juga menghadapi risiko kerusakan fisik yang signifikan akibat kecepatan bilah turbin yang tinggi dan bervariasi serta paparan berkepanjangan terhadap kondisi lingkungan. Perputaran bilah turbin didorong oleh aliran angin, jika kecepatan angin lebih besar maka dapat meningkatkan kecepatan putaran. Peningkatan kecepatan ini meningkatkan risiko kerusakan struktural pada turbin angin, sehingga perlu adanya pembatasan pada kecepatan putaran bilah demi keselamatan. *Nacelle*, yang berisi komponen mekanis dan listrik penting untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, adalah bagian kunci lainnya dari turbin. 4, yang biasanya terdiri dari dua jenis, digunakan tergantung pada jenis turbin, baik itu modular maupun *direct drive*, yang berbeda terutama dalam sistem transmisi ke generator.

Risiko kegagalan turbin angin dipengaruhi tidak hanya oleh integritas komponen tetapi juga oleh faktor geografis. Aspek-aspek ini sangat penting untuk menilai kelayakan teknis dan ekonomi dari pembangunan pembangkit listrik tenaga angin. Misalnya, kondisi tanah harus mampu mendukung turbin angin yang dapat mencapai ketinggian hingga 80 meter, karena patahnya bilah bisa terjadi akibat sambaran petir. Turbin angin sangat rentan terhadap sambaran petir karena tingginya dan tidak adanya bangunan lebih tinggi di sekitarnya. Petir dapat mengenai bilah, meningkatkan temperaturnya hingga 30.000°C dan menyebabkan ekspansi udara yang eksplosif, yang dapat mengakibatkan patahnya bilah.

Turbin angin sumbu vertikal menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan turbin sumbu horizontal, termasuk pemasangan dan konfigurasi yang lebih mudah di area dengan kondisi angin yang bervariasi. Selain itu juga mampu menghasilkan Listrik yang lebih stabil dan memiliki kecepatan awal yang rendah. Hal ini membuat penulis terdorong agar meneliti desain sudu turbin skala kecil dengan tipe H-rotor untuk mengevaluasi keamanan dan efisiensinya di Indonesia. Dalam penelitian ini, penulis melakukan analisa terhadap Darrieus VAWT H-Rotor tipe menggunakan software solidworks.

34

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penulisan dari tugas akhir ini yaitu:

1. Mengetahui pengaruh variasi material aluminium (*alloy 1060*) dan kayu (*balsa*) pada airfoil saat diberi beban gaya dan terkena angin sehingga mendapatkan material yang optimal.
2. Mengetahui nilai stress dan displacement dari kedua material yaitu kayu balsa dan aluminium pada bilah turbin angin agar dapat menentukan material yang aman.
3. Mengetahui rancangan tipe bilah yang sesuai kondisi angin sehingga diperoleh nilai safety factor dari dua material yang sudah ditentukan.

1.3 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah mengenai penelitian untuk menjelaskan secara rinci tentang penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi material alumunium (*alloy 1060*) dan kayu (*balsa*) pada airfoil saat diberi beban gaya dan terkena angin sehingga mendapatkan material yang optimal?
2. Bagaimana pengaruh nilai stress dan displacement dari kedua material yaitu kayu (*balsa*) dan alumunium (*alloy 1060*) pada bilah turbin angin agar dapat menentukan material yang aman?
3. Bagaimana rancangan tipe bilah yang sesuai kondisi angin sehingga diperoleh nilai *safety factor* dari dua material yang sudah ditentukan?

12

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian ini dapat disampaikan melalui poin-poin, yakni sebagai berikut:

1. Penelitian ini bagi penulis sendiri dapat dijadikan sebagai bahan pembelajaran pada bidang komputasi serta teori yang didapat selama perkuliahan untuk menganalisis perhitungan pada suatu pembangkit, khususnya mata kuliah sistem pembangkit tenaga, konversi dan konservasi energi.
2. Menambah wawasan tentang turbin angin Darrieus khususnya Tipe H-Rotor dalam menanggapi perubahan variasi desain, serta diharapkan penelitian ini dapat memberi manfaat berupa pengetahuan dalam dunia turbin secara komprehensif.
3. Memberi referensi dasar dalam merancang kembali bilah turbin darrieus dengan menggunakan sudu tipe H-rotor serta menjadi acuan pada pengembangan turbin angin khususnya untuk rancangan turbin angin dengan menggunakan NACA 0012 sebagai profil bilah.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup bertujuan untuk menghimpunkan masalah pada penelitian ini, maka ruang lingkup yang diangkat adalah sebagai berikut:

1. Airfoils yang digunakan adalah NACA 0012.
2. Pembuatan bilah dengan material kayu balsa dan alumunium *alloy 1060*.

3. Perancangan turbin angin menggunakan kapasitas daya maksimum sebesar 125 W.
4. Untuk pengambilan data digunakan angin berkecepatan konstan yakni 3 hingga 8m/s.
5. Nilai *Safety factor* lebih dari 2 untuk turbin angin vertikal
6. Koefisien Daya (C_p) untuk turbin darrieus H-Rotor senilai 0.45

1.6 Sistematika Penulisan

Skripsi ini mempunyai sistematika penulisan yang terdiri dari beberapa bab, dimana setiap bab mempunyai korelasi dengan bab lainnya. Adapun sistematika penulisan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bab satu ini terdiri dari latar belakang permasalahan, perumusan dan batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian serta sistematika penulisan yang dapat dijadikan dasar untuk penelitian yang akan dikaji.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab dua ini menjabarkan teori dari studi literatur yang didapat berkaitan dengan masalah pada skripsi ini agar dapat memberikan pemahaman lebih umum mengenai materi penelitian.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab tiga ini memaparkan langkah-langkah penelitian atau tahap pada proses simulasi yang bertujuan agar penulis dapat melakukan penelitian yang tertata dengan baik dan lebih terarah.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab empat ini menunjukkan proses simulasi serta penjelasannya dari menggunakan formula tertentu dan mengolah data yang telah dihitung sampai hasil akhir yang terdapat pada proses analisis.

7

BAB 5 PENUTUP

Pada bab lima ini menjelaskan kesimpulan dari analisis yang sudah diperoleh saat proses simulasi adapun saran dengan tujuan untuk membantu penelitian di masa depan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Turbin angin atau juga dikenal sebagai kincir angin merupakan mesin yang mampu mengubah energi angin menjadi listrik. Turbin angin berfungsi untuk mengubah energi kinetik angin menjadi gerakan dalam bentuk rotasi rotor dan poros; energi gerakan yang dihasilkan dari angin kemudian diteruskan sebagai gerakan dan torsi ke poros generator, yang kemudian menghasilkan energi listrik. Berdasarkan sumbu gerakannya, turbin angin dibagi menjadi dua jenis, yaitu turbin angin sumbu horizontal dan vertikal. Sementara itu, berdasarkan gaya aerodinamis, turbin angin dibagi menjadi dua jenis: *lift* dan *drag*.

Diketahui bahwa terdapat turbin angin yang memakai sudu/bilah berjenis *drag* dan *lift*. Dua jenis ini memiliki dua perbedaan dalam kecepatan rotasi putaran. Bilah turbin *drag* berotasi pada kecepatan rendah, sehingga dapat disebut juga sebagai turbin angin berputaran rendah. Sedangkan bilah turbin angin *lift* cenderung berotasi pada kecepatan tinggi, sehingga dapat disebut turbin angin berputaran tinggi.

2.1.1 Sejarah Turbin Angin

Turbin angin merupakan perangkat yang bisa mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Energi kinetik ini disalurkan melalui rotor dan diubah oleh generator turbin angin. Awalnya, turbin digunakan untuk memenuhi kebutuhan para petani untuk menggiling padi, irigasi, dll. Turbin angin banyak digunakan di Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lainnya pada awal abad 19 dan lebih dikenal sebagai kincir angin. Salah satunya adalah yang dirancang di masa lalu dibuat oleh Poul La Cour, seorang profesor di Pusat Pendidikan Dewasa di Denmark ketika tahun 1889 (Gambar 2.1).

Turbin angin terbesar pada abad ini adalah Enercon E-126, yang dapat menghasilkan 7 megawatt energi listrik ketika kecepatan angin rata-rata. Kapasitas ini mampu memenuhi kebutuhan listrik harian untuk 4.500 rumah. Turbin angin raksasa dengan kapasitas 10 megawatt juga telah dibangun pada

tahun 2011 oleh Enova SF di Norwegia. Dengan adanya pengganti bahan bakar fosil ini, energi angin memainkan peran yang cukup penting sebagai sumber energi terbarukan di abad ini.



Gambar 2.1 Rancangan turbin angin pertama oleh Pou La Cour saat tahun 1891

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, penggunaan kincir angin juga telah dimanfaatkan oleh manusia sebagai sumber tenaga untuk menggilingkan biji-biji seperti padi dan memompa air. Hal ini dikarenakan pada abad ke-13, penggilingan biji-bijian telah dikenal di sebagian besar Eropa, dan pada abad ke-19, penggunaan kincir angin meluas menjadi alat untuk memompa air dan mengairi ladang.

Penggunaan kincir angin sebagai alat konversi energi adalah aplikasi energi angin yang paling banyak diteliti di mana kincir angin digunakan untuk menggerakkan generator yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Dan sekarang ini kincir angin juga disebut sebagai turbin angin



Gambar 2.10 Turbin Angin Modern

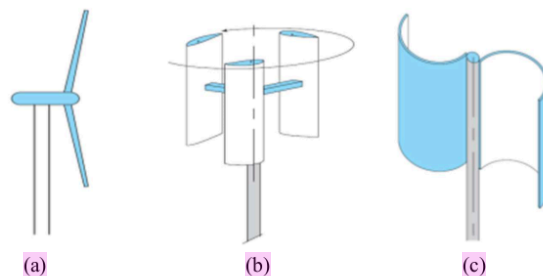
Sumber : https://id.wikipedia.org/wiki/Turbin_angin

Era turbin angin untuk pembangkit listrik dimulai pada tahun 1900-an. Turbin angin modern yang paling umum digunakan untuk menghasilkan listrik adalah turbin angin sumbu horizontal. Di Belanda, turbin ini dapat menghasilkan 700 watt energi listrik dengan tiga bilah dan diameter 1,7 meter.

2.1.2 Jenis Jenis Turbin Angin

Jenis-jenis turbin angin dapat secara luas dikategorikan menjadi dua jenis: *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). HAWT memiliki sumbu putar yang sejajar dengan tanah, sedangkan VAWT memiliki sumbu putar yang vertikal atau tegak lurus terhadap tanah. VAWT menawarkan kelebihan seperti desain yang cukup sederhana.

Kemampuan untuk beroperasi dalam segala arah angin, kebisingan yang minimal, integrasi yang mudah dengan struktur arsitektur lainnya, dan instalasi generator, gearbox, dan bantalan yang mudah. VAWT pada umumnya memiliki torsi juga bahkan dapat lebih besar, walaupun efisiensinya keseluruhan lebih rendah dibandingkan jenis HAWT.



Gambar 2.19 Jenis Turbin Angin

(a) HAWT, (b) VAWT Darrieus tipe H-Rotor, (c) VAWT Savonius (Hemami, A. 2012)

Gambar di atas menggambarkan jenis-jenis turbin angin, yang mencakup jenis HAWT dan VAWT. Tipe VAWT yang paling umum digunakan untuk pembangkit listrik adalah tipe Darrieus. Karakteristik-karakteristik dari jenis turbin angin Savonius dan Darrieus ditunjukkan dalam tabel 2.1.

Tabel 2.1 Karakteristik Savonius dan Darrieus

No.	Savonius	Darrieus
1.	Menggunakan gaya dorong untuk berputar	Menggunakan gaya angkat untuk berputar
2.	Koefisien daya relatif lebih rendah dibanding darrieus	Efisiensi relatif lebih tinggi dibanding savonius
3.	Bekerja saat kecepatan angin rendah	Bekerja saat kecepatan angin tinggi
4.	Sudu berbentuk setengah silinder	Sudu menggunakan penampang airfoil

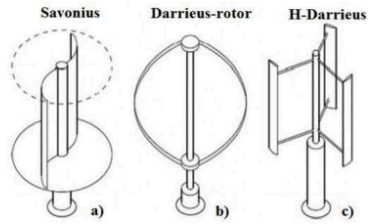
Turbin angin Darrieus mempunyai banyak tipe, dengan perbedaan pada bentuk bilahnya. Perubahan dalam bentuk bilah dilakukan untuk mengatasi masalah. Tipe jenis turbin yaitu seperti H-Rotor, Helical, Quite Revolution, dan Troposkien. Namun struktur yang sederhana adalah H-Rotor tipe, yang menggunakan bentuk bilah yang lurus.

2.1.2.1 VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)

VAWT memiliki sumbu rotor utama yang disusun secara vertikal. Keuntungan utama dari turbin angin ini adalah bahwa ia tidak perlu diarahkan ke arah datangnya angin untuk menjadi efektif. Keuntungan ini sangat berguna di lokasi-lokasi di mana arah angin bervariasi secara signifikan.

Dengan sumbu vertikal, generator dan gearbox dapat ditempatkan dekat dengan tanah. Namun, ini menyebabkan beberapa desain menghasilkan tenaga putaran yang berdenyut. Mengenai rotor turbin, VAWT bergerak tanpa dipengaruhi oleh arah datangnya angin, jadi VAWT tidak memerlukan mekanisme pengontrol arah seperti ekor pada HAWT.

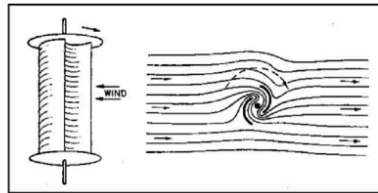
Seperti yang terlihat pada Gambar 2.4, berdasarkan jenis rotor, VAWT dibagi menjadi tiga, yaitu: Rotor Savonius, Rotor Darrieus, dan H-Rotor (*giromill*).



Gambar 2.28 Jenis turbin angin vertikal

a.) Savonius Rotor

Savonius Rotor pada awalnya dikembangkan oleh Savonius J. pada tahun 1920-an. Awalnya konsep savonius dikembangkan oleh Flettner yang bentuknya terbuat dari silinder yang diperpendek sepanjang bidang sumbu menjadi dua bagian, yang dibuat menyilang membentuk huruf S.



Gambar 2.37 Rotor Savonius

Tipe turbin ini secara umum dikenal bergerak sedikit lambat dibandingkan dengan turbin angin horizontal, namun dapat memiliki torsi yang lumayan besar.

b.) Darrieus Rotor

Turbin angin Darrieus ditemukan oleh Georges Darrieus pada tahun 1931. Turbin ini memanfaatkan prinsip aerodinamis dan gaya angkat. Meskipun memiliki torsi rotor yang rendah, turbin Darrieus berputar lebih cepat dibandingkan Savonius, menjadikannya unggul dalam menghasilkan energi listrik. Namun, turbin ini memerlukan energi awal untuk beroperasi.

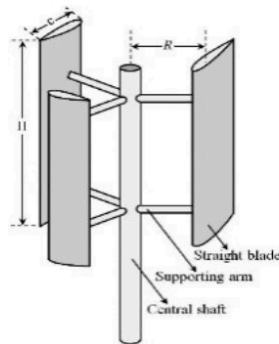
c.) H-rotor

H-rotor adalah variasi dari tipe Darrieus, keduanya memanfaatkan gaya angkat untuk menggerakkan bilahnya. H-rotor lebih sederhana karena menggunakan bilah lurus, tidak seperti bilah melengkung yang terdapat pada tipe Darrieus. Bilah ini lalu terhubung ke bagian poros dengan batang atau lengan, yang terhubung ke generator.

- Keuntungan dari turbin angin sumbu vertikal (VAWT) meliputi:
 - Tidak perlu menara besar.
 - Pemeliharaan cenderung mudah dikarenakan konstruksinya dapat di taruh di permukaan tanah.
 - Sudut sayap yang lebih tinggi untuk aerodinamika yang lebih baik dan pengurangan *drag* pada berbagai tekanan.
 - Wilayah tiupan yang lebih besar dari bilah lurus dengan penampang persegi atau persegi panjang.
 - Tidak perlu mengubah posisi saat arah angin berubah.
 - Rasio kecepatan ujung yang lebih rendah, mengurangi risiko kerusakan saat angin kencang.
- Kekurangan VAWT adalah:
 - Sebagian besar VAWT hanya menghasilkan 50% dari efisiensi energi turbin angin sumbu horizontal (HAWT) karena *drag* tambahan selama rotasi.
 - VAWT tidak bisa memanfaatkan angin besar pada ketinggian tinggi.
 - Sebagian besar VAWT menampilkan torsi yang rendah diawal.

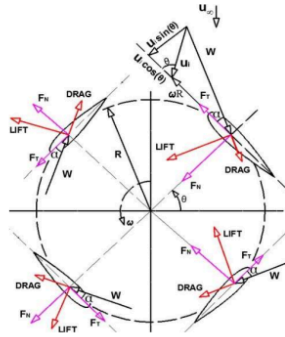
2.1.2.2 VAWT Darrieus tipe H-Rotor

Terdapat dua parameter seperti *Solidity* (σ) dan *Aspect Ratio* (μ). Rasio ini didasarkan pada dimensi turbin angin, seperti yang diilustrasikan untuk tipe VAWT Darrieus H-Rotor dalam gambar berikut.



Gambar 2.46 VAWT Darrieus tipe H-Rotor/*Giromill* (Mojtaba dkk., 2014)

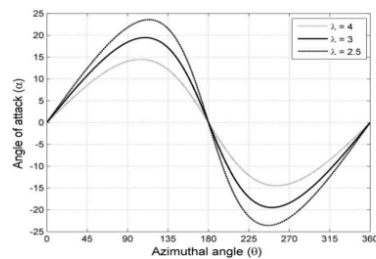
Turbin angin H-Rotor memiliki rotasi yang 90° terhadap aliran udara. Maka dari itu, penampang sudu (airfoil) dapat mengalami perubahan sudut serang (α) setiap satu putaran penuh. Sudut ini ditentukan oleh vektor hasil arah aliran angin (u_∞) dan kecepatan tangensial rotasi sudu (uT), yang dikenal sebagai angin relatif (w).



Gambar 2.55 Vektor gaya pada H-Rotor (Biadgo dkk. 2013)

Ketika sudu berputar, arus udara menghasilkan gaya yang aerodinamik. Gaya angkat (F_L) serta dorong (F_D) dapat bervariasi sesuai sudut azimuth (θ) dan TSR (λ). Gaya aerodinamika ini mampu dibagi menjadi komponen-komponen seperti gaya normal (F_N), yang relevan untuk integritas struktural, dan gaya tangensial (F_T), yang mempengaruhi performa dari turbin angin vertikal.

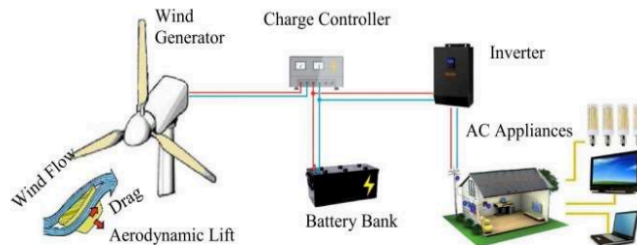
Kinerja aerodinamis VAWT sangat terkait dengan TSR atau *Tip Speed Ratio*. Rasio ini memengaruhi kecepatan angin relatif yang mengenai sudu dan sudut serang. Dengan *Tip Speed Ratio* yang tinggi, sudut serang maksimum yang dapat dijangkau cenderung kecil, namun bertambah ketika TSR menurun, seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.64 Perbandingan TSR pada *angle of attack* dan azimuth (Ebobi, O., 2013)

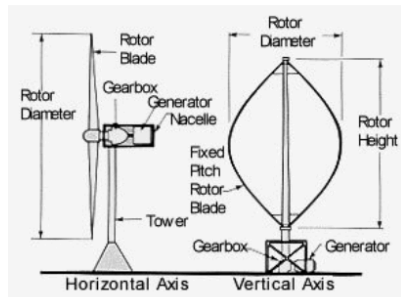
2.1.3 Prinsip Kerja Turbin Angin Skala Mikro

Turbin Angin Mikro beroperasi dengan mengubah putaran bilahnya menjadi tegangan AC tiga fase, yang kemudian dikirim ke pengontrol. Pengontrol menstabilkan dan mengubah tegangan AC ini menjadi tegangan DC, karena penyimpanan energi memerlukan DC. Setelah konversi ini, data dicatat melalui data logger, yang mengumpulkan berbagai metrik seperti tegangan, arus, kecepatan angin, dan arah angin untuk digunakan di masa mendatang. Energi listrik disimpan dalam baterai setelah melewati data logger. Sebelum digunakan langsung oleh beban AC, energi yang disimpan ini harus diubah kembali menjadi tegangan AC menggunakan inverter.



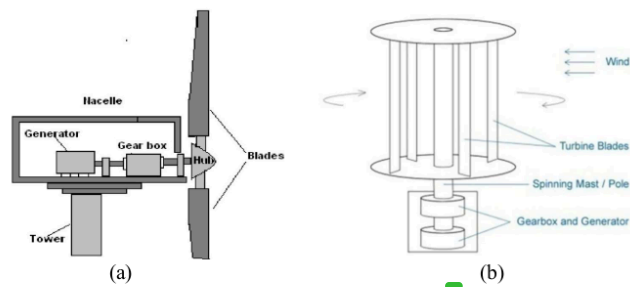
Gambar 2.73 Prinsip Kerja Turbin Angin Skala Mikro.

2.1.4 Konstruksi Turbin Angin Skala Mikro



Gambar 2.82 Komponen Turbin Angin

Turbin angin mikro jauh lebih kecil dalam ukuran dan daya keluaran dibandingkan dengan turbin angin konvensional, dengan elemen utamanya adalah sebagai berikut:



Gambar 2.91 Rancangan sederhana dari Turbin Angin

(a) Turbin angin horizontal (b) Turbin angin vertikal

- Rotor/bilah (*blade*) adalah satu dari komponen utama pada turbin angin. Rotor ini berfungsi mengubah aliran udara menjadi gerakan berputar pada sudu turbin.
- *Cone/hub* merupakan komponen pelindung bagian dalam turbin angin dan digunakan untuk memencarkan atau mendistribusikan angin yang menuju pusat turbin.
- *Nacelle* adalah bagian dari turbin angin sebagai tempat untuk menempatkan generator yang akan digunakan.
- *Pole/shaft (tower)* adalah komponen yang berfungsi sebagai penyangga turbin angin untuk mendapatkan atau menangkap angin pada suatu ketinggian tertentu.
- *Flange* atau piringan dan baut yang memiliki fungsi untuk mengaitkan atau menempelkan blade pada rotor turbin angin. Flange juga memiliki fungsi sebagai pengaman tambahan dan memudahkan apabila dilepas atau dipasang kembali tanpa merusak bilah yang telah disambung dari bilah ke generator
- *Gear Transmission/mechanism (gearbox)* merupakan komponen yang berfungsi untuk menghasilkan energi mekanik putaran rotor yang dijaga agar sesuai dengan karakteristik atau spesifikasi dari generator.
- Baterai adalah fasilitas atau suatu tempat penyimpanan dari energi listrik yang telah dihasilkan oleh generator sebelum digunakan pada beban.

- Generator merupakan suatu alat atau komponen atau mesin yang berfungsi untuk merubah energi mekanik menjadi energi listrik setelah melewati proses induksi elektromagnetik yang disebabkan oleh gerak rotasi dari shaft generator. Energi listrik yang telah dihasilkan dari proses induksi elektromagnetik pada kumparan stator ini akan menghasilkan arus listrik AC tiga fasa.
- *Controller/inverter* yaitu suatu rangkaian elektrik yang memiliki fungsi sebagai pengatur tegangan masukan yang dihasilkan sebelum dialirkan menuju ke dalam baterai.

2.2 Perhitungan Gaya pada Turbin

Gaya angin adalah gaya yang dihasilkan oleh aliran angin yang menerpa suatu benda. Gaya ini dapat menyebabkan tekanan pada struktur tersebut, dan perlu dipertimbangkan dalam perencanaan konstruksi dan desain untuk memastikan stabilitas dan keamanan. Persamaan dasarnya adalah sebagai berikut (*College Physics by OpenStax*, Chapter 5.2):

$$F = 0,5 \times \rho \times A \times V^2 \quad (2.1)$$

F = Gaya Angin (Newton)

²⁹
 ρ = Densitas udara (kg/m³)

A = Luas permukaan yang terkena angin (m²)

V = Kecepatan angin (m/s)

2.2.1 Luas Sapuan Permukaan Turbin

Luas sapuan pada sudu turbin dapat ditemukan dengan persamaan berikut:

$$A_{swept} = \pi \times D \times H \quad (2.2)$$

Dimana:

L = Panjang chord

H = Tinggi bilah

2.2.2 Kecepatan Rotasi

dan n , kecepatan rotasi turbin (RPM), dapat ditentukan oleh persamaan berikut:

$$n = \frac{60}{\pi} \frac{V}{2R} \quad (2.3)$$

Dimana:

V = Kecepatan angin

R = Radius dari rotor

2.2.3 Torsi

T merupakan torsi pada turbin, yang dinyatakan dalam persamaan ini:

$$T = 9,55 \times \frac{P}{n} \quad (2.4)$$

Dimana:

F = Gaya pada bilah (Newton)

P = Daya yang dikirim ke rotor (Watt)

n = Kecepatan sinkron (rpm)

9,55=konstanta

2.3 Parameter Desain Turbin Angin

Mengingat bahwa sebelumnya juga dinyatakan bahwa faktor dari daya turbin yaitu TSR, maka penting untuk mencantumkan Parameter Desain Turbin Angin. salah satunya adalah TSR atau ⁵²Tip Speed Ratio merupakan rasio kecepatan dari ⁵²sudu dengan kecepatan udara. Dari sini dapat dipahami bahwa TSR adalah salah satu parameter yang penting untuk menganalisa turbin angin. Ketika angin berkecepatan tertentu, TSR juga dapat memengaruhi ¹kecepatan putaran rotasi dari rotor. Turbin angin yang menggunakan jenis *lift* biasanya mempunyai nilai TSR lebih tinggi dibanding turbin berjenis drag.

2.3.1 Tip Speed Ratio (λ)

Tip Speed Ratio atau TSR adalah perbandingan antara kecepatan pada ujung bilah dengan kecepatan angin yang dilewatinya, TSR dapat diketahui menggunakan rumus berikut.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w} \quad (2.5)$$

Dengan,

λ = Tip Speed Ratio

ω = Kecepatan sudut rotor turbin (rad/s)

R = Jari-jari rotor (m)

v_w = Kecepatan angin (m/s)

Selain persamaan tersebut TSR juga dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\lambda = \frac{\text{blade tip speed}}{v_w} \quad (2.6)$$

Blade tip speed adalah kecepatan ujung bilah, yang memiliki persamaan berikut:

$$\text{blade tip speed} = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{60} \quad (2.7)$$

Dimana D adalah diameter turbin.

Sehingga hubungan antara kecepatan putar dan Tip Speed Ratio juga dapat ditunjukkan dalam persamaan berikut,

$$\lambda = \frac{2\pi n R}{60 \cdot v_w} \quad (2.8)$$

Dengan,

λ = Tip Speed Ratio

n = Kecepatan putar rotor turbin (rpm)

R = Jari-jari rotor (m)

v_w = Kecepatan angin (m/s)

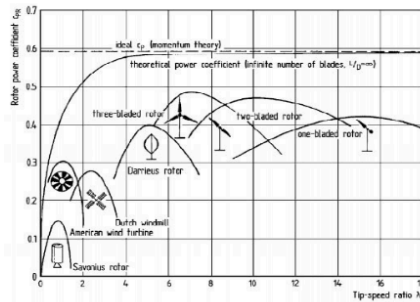
Berdasarkan persamaan ini, juga dapat dijelaskan bahwa terdapat hubungan yang 180° oleh kecepatan putaran rotor dan jari-jari bilah. Pada TSR yang sama, bilah dengan jari-jari yang lebih panjang memiliki kecepatan rotasi lebih kecil.

Oleh karena itu, jika nilai semakin TSR tinggi, maka semakin tinggi pula efisiensi turbin angin. Namun, hal ini juga menunjukkan bahwa tingkat kebisingan yang tinggi mungkin terjadi. Secara umum, turbin dengan rpm rendah mempunyai

nilai TSR berkisar antara satu hingga empat, sedangkan turbin dengan kecepatan rotasi tinggi memiliki nilai TSR kisaran antara lima hingga sembilan.

Untuk desain awal, nilai TSR yang optimal untuk turbin dengan sudu 1 hingga 3 adalah sekitar 5 yang menunjukkan turbin angin dapat beroperasi dengan koefisien daya (C_p) yang hampir maksimal.

Koefisien daya sebagai fungsi dari TSR pasti akan berbeda baik untuk satu turbin dengan turbin yang lainnya. Hal ini dikarenakan ada banyaknya jenis turbin dengan berbagai karakteristik serta tipe. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.12, yang menampilkan kurva koefisien daya dan TSR.



Gambar 2.100 Kurva/Grafik TSR dan C_p (Mahmoud, A. & Ahmed, A.G. 2016)

2.3.2 Koefisien Daya (C_p)

Daya *output* turbin sangat bervariasi dengan rpm turbin, maka dari itu performa pada bilah juga biasa ditampilkan dalam grafik koefisien daya terhadap TSR. Hanya saja, hal ini juga mampu ditampilkan oleh grafik koefisien momen, dikarenakan koefisien momen (C_M) juga berkorelasi dengan daya yang didapat dari koefisien daya (C_P).

Nilai daya pada angin dapat diperoleh dari persamaan 2.9.

$$P_{angin} = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (2.9)$$

Dengan,

P_{angin} = Daya keluaran (W)

ρ = Densitas udara (kg/m^3)

v = Kecepatan (m/s)

A = Luas sapuan (m^2)

Sementara itu, nilai dari daya mekanik turbin juga bisa didapat dari rumus

2.10.

$$P_{mekanik} = \omega \cdot T \quad (2.10)$$

Dengan,

$P_{mekanik}$ = Daya mekanik (W)

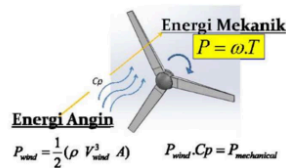
ω = Kecepatan putaran turbin (rad/s)

T = Torsi (Nm)

Kesanggupan turbin dalam mengonversi energi angin menjadi kinetik disebut koefisien daya (C_p). Nilai koefisien daya adalah rasio antara daya output dan daya input dari turbin; formula agar mendapat nilai koefisien daya yaitu.

$$C_p = \frac{P_{mekanik}}{P_{angin}}$$
$$C_p = \frac{\omega \cdot T}{\frac{1}{2} \rho v^3 A} \quad (2.11)$$

Dimana $P_{mekanik}$ adalah daya mekanik dan P_{angin} adalah daya angin. Maka dapat disimpulkan Koefisien daya merupakan faktor penting saat merancang turbin dikarenakan menampilkan seberapa banyak daya yang diekstraksi dari energi kinetik saat melewati permukaan turbin. Koefisien daya juga secara signifikan memengaruhi kinerja turbin dan juga memiliki pengaruh oleh desain dan konstruksi turbin.



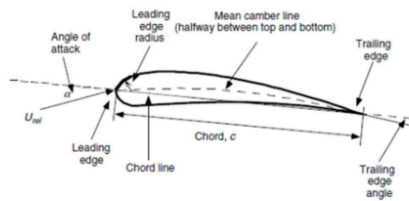
Gambar 2.109 Konversi energi pada turbin

(Sumber : Lentera Angin Nusantara, 2014)

2.4 Aspek Geometri Bilah

Bilah pada umumnya pasti memiliki bentuk geometri yang bermacam macam. Pada umumnya juga geometri dari sebuah bilah yaitu berbentuk airfoil. Airfoil merupakan bentuk geometris dari suatu badan pesawat tertentu atau

penampang yang digunakan untuk menghasilkan efek aerodinamika ketika bilah bertemu atau melewati suatu aliran dari fluida atau udara. Penampang dari bilah turbin angin juga memiliki bentuk airfoil agar memiliki efisiensi kerja yang tinggi.



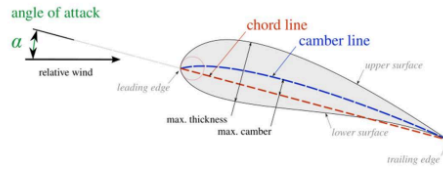
Gambar 2.118 Geometri airfoil.

Berikut ini merupakan penjelasan singkat dari gambar *airfoil* diatas:

- a. *Leading edge* merupakan bagian paling depan dari sebuah *airfoil*.
- b. *Trailing edge* merupakan bagian paling belakang dari sebuah *airfoil*.
- c. *Chamber line* merupakan garis yang membagi sama besar antara permukaan atas dan permukaan bawah dari *airfoil mean chamber line*.
- d. *Chord line* merupakan garis yang menyatukan *trailing* dan *leading edge*.
- e. *Chord* merupakan panjang dari *trailing* dan *leading edge*.
- f. *Maximum chamber* yaitu panjang maksimum dari *chord line* dan *mean chamber line*. Posisi maksimum *chamber* dihitung dari *leading edge* dalam bentuk persentase *chord*.
- g. *Maximum thickness* merupakan jarak maksimum antara bagian atas dan bawah *airfoil* yang juga dianggap tegak lurus dengan *chord line*.

2.4.1 Pengertian Airfoil

Airfoil atau geometri dari penampang vertikal bilah turbin dirancang untuk menyerap aliran fluida di sekitarnya. *Airfoil* secara umum digunakan pada sayap pesawat, bilah propeller, bilah kompresor, bilah turbin angin, turbin jet, dan hydrofoil. Parameter dari *airfoil* diilustrasikan dalam gambar 2.15



Gambar 2.125 Gambar Airfoil.

Airfoil hadir dalam berbagai bentuk dan ukuran sesuai dengan standar yang berbeda, yang umumnya dikategorikan sebagai simetris dan asimetris. Organisasi seperti ² National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) dan National Renewable Energy Laboratory (NREL) menetapkan standar airfoil. Meskipun banyak bentuk airfoil yang ada, standar NACA adalah yang paling dominan di industri pesawat terbang dan turbin angin.

2.4.2 NACA 0012

Foil NACA empat digit menunjukkan karakteristik spesifik: ¹ digit pertama menunjukkan maksimum kemiringan sebagai persentase dari chord, digit kedua menunjukkan posisi maksimum kemiringan sepanjang chord, dan dua digit terakhir mewakili ketebalan foil sebagai persentase dari chord. NACA 0012 adalah foil simetrik, karena tidak memiliki kemiringan; garis kemiringan berimpit dengan chord (Hidayat, M.F. 2014).

2.5 Stress dan Displacement

2.5.1 Tegangan (Stress)

Tegangan atau *stress* dapat didefinisikan sebagai gaya atau reaksi per unit area, yang menyebabkan deformasi pada suatu objek. Hal ini dapat mengukur intensitas gaya dan terdiri dari dua jenis: *engineering stress* dan *true stress* (Lammirta & Tedianto, 2018). Biasanya, gaya diukur dalam *pound* atau *Newton*, dan area dalam inci persegi atau milimeter persegi, sehingga tegangan umumnya dinyatakan dalam *pound/inch²* (psi) atau *Newton/mm²* (MPa). Hubungan antara stres, gaya, dan luas area dapat dijelaskan dengan persamaan tertentu.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.15)$$

Dimana,

σ = Tegangan

F = Gaya yang diberikan

A = Luas penampang

2.5.2 Regangan (*Strain*)

Regangan adalah perubahan panjang suatu struktur akibat gaya yang diterapkan, yakni perbedaan antara panjang awal material dan panjang material setelah akibat adanya gaya tarik atau tekan. Regangan memiliki batas, di mana sifat elastis berhenti, dan tegangan serta regangan tidak lagi berhubungan secara linier setelah material mencapai plastisitas.

$$\varepsilon = \frac{\delta l}{l} \quad (2.16)$$

Dimana,

δl = Perubahan panjang benda

l = Panjang benda asli

2.5.3 Teori *Von Mises*

Von Mises (1913) mencatat bahwa *yielding* terjadi ketika energi distorsi atau energi regangan geser dari suatu material mencapai nilai kritis. Energi distorsi adalah bagian dari total energi regangan per unit volume yang terlibat dalam perubahan bentuk. Konsep ini dapat dirumuskan menjadi persamaan *Von Mises stress* atau *equivalent tensile stress*, σ , yaitu:

$$\sigma_{vm} = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right\}^{0.5} \quad (2.17)$$

Dimana,

σ_1 = tegangan axial/*maximum principal stress*

σ_2 = tegangan radial/*intermediate principal stress*

σ_3 = tegangan tangensial/*minimum principal stress*

Teori ini digunakan untuk material elastis sebagai alternatif dari teori energi maksimum.

2.6 *Safety Factor*

Menurut Mott, Robert L. (2004) faktor keselamatan (N) mengukur keamanan komponen di bawah beban (Salafudin, 2015). Kekuatan suatu material

dibagi oleh faktor desain untuk menentukan tegangan desain (σ_d), atau dapat disebut juga dengan tegangan yang diizinkan (*allowed stress*). Maka dari itu, tegangan aktual pada suatu komponen harus tetap di bawah tegangan desain. Nilai faktor desain untuk peralatan biasanya adalah

Tabel 2.2 Faktor Keselamatan Umum Secara Keseluruhan

FOS - Factors of Safety - Equipment	
Equipment	Factor of Safety - FOS -
Aircraft components	1.5 - 2.5
Boilers	3.5 - 6
Bolts	8.5
Cast-iron wheels	20
Engine components	6 - 8
Heavy duty shafting	10 - 12
Lifting equipment - hooks	8 - 9
Pressure vessels	3.5 - 6
Turbine components - static	6 - 8
Turbine components - rotating	2 - 3
Spring, large heavy-duty	4.5
Structural steel work in buildings	4 - 6
Structural steel work in bridges	5 - 7
Wire ropes	8 - 9

Dalam beberapa kasus, lebih baik menghitung faktor keselamatan (N) berdasarkan tegangan aktual dan kekuatan material.

Dalam persamaan sederhana, ini adalah rasio perbandingan antara tegangan maksimum dan tegangan yang diizinkan.

$$Factor\ of\ safety = \frac{Maximum\ stress}{working\ or\ design\ stress} \quad (2.18)$$

Untuk kasus material ulet seperti baja lunak, *safety factor* didasarkan pada tegangan titik luluh, yang dituliskan sebagai persamaan berikut:

$$Factor\ of\ safety = \frac{Yield\ point\ stress}{working\ or\ design\ stress} \quad (2.19)$$

Untuk kasus material getas, *safety factor* didasarkan pada *ultimate stress* dan dituliskan dalam persamaan berikut.

$$Factor\ of\ safety = \frac{ultimate\ stress}{working\ or\ design\ stress} \quad (2.20)$$

Dalam melakukan penelitian, nilai faktor rancangan yang wajar harus dapat ditentukan untuk situasi tertentu. Aturan standar untuk faktor desain dan nilai stres telah ditetapkan oleh organisasi seperti *American Society of Mechanical Engineers, American Gear Manufacturers Association, Aluminum Association,* dan *American Institute of Steel Construction*. Nilai faktor desain untuk material biasanya adalah:

Tabel 2.3 Faktor keselamatan untuk material

Applications	Factor of Safety - FOS -
Digunakan untuk material yang sangat andal dimana beban dan kondisi lingkungan tidak parah dan berat merupakan pertimbangan penting	1.3 - 1.5
Digunakan untuk material yang dapat diandalkan dimana beban dan kondisi lingkungan tidak parah	1.5 - 2
Digunakan untuk material biasa dimana beban dan kondisi lingkungan tidak terlalu parah	2 - 2.5
Digunakan untuk bahan yang kurang teruji dan rapuh dimana beban dan kondisi lingkungan tidak terlalu parah	2.5 - 3
Digunakan untuk material yang sifatnya tidak dapat diandalkan dan dimana beban dan kondisi lingkungan tidak parah, atau dimana material yang dapat diandalkan digunakan pada kondisi lingkungan yang sulit	3 - 4

2.7 Computer Aided Design (CAD)

Computer Aided Design (CAD) memanfaatkan sistem komputer untuk memodifikasi, menganalisis, dan mengoptimalkan desain produk. Ini adalah alat teknik yang efisien yang digunakan di berbagai bidang seperti otomotif, maritim, pesawat terbang, dan desain industri. Perangkat lunak CAD menawarkan gambar 2D dan pemodelan solid 3D, memungkinkan gambar tiga dimensi untuk diputar agar dapat dilihat dari berbagai sudut dan memeriksa geometri dari semua perspektif.

CAD dapat diaplikasikan untuk membangun konsep dan tata letak produk, merinci metode produksi melalui perakitan dan menyediakan model rekayasa dalam gambar manufaktur 3D atau 2D. Dibandingkan dengan gambar manual, CAD secara signifikan mengurangi waktu desain, meningkatkan kualitas desain, dan mengoptimalkan geometri yang kompleks.

2.7.1 3D Modelling

3D modelling dengan menggunakan *software* solidworks memungkinkan tampilan matematis dan analisis geometri permukaan pada objek 3D. Proses ini, termasuk pemodelan benda solid yang berdasarkan pada volume dan *shell*/batas yang mampu menentukan objek dengan menetapkan permukaan dan batasnya.

Pemodelan 3D mengubah baik titik permukaan garis besar maupun titik internal menjadi elemen poligon yang mewakili volume untuk rendering model. Pemodelan poligon ini adalah metode yang banyak digunakan karena akurasi, fleksibilitas, dan kecepatan dalam proses meshing. Dalam pendekatan ini, titik-titik dihubungkan menggunakan banyak elemen garis kecil untuk membuat *mesh polygon*.

2.8 ¹⁵ Finite Element Analysis (FEA)

Metode Elemen Hingga atau *finite element method* (FEM) adalah teknik numerik yang digunakan untuk analisis element hingga atau *finite element analysis* (FEA), yang bertujuan agar nilai tegangan berdasarkan perpindahan struktur yang terjadi dapat ditentukan. Proses ini melibatkan pembagian struktur menjadi elemen kecil yang terhubung oleh titik *nodal*. Pada saat diberi beban, nodal ini nanti menjadi sebuah respons terhadap tegangan dengan perpindahan.

Ketika elemen yang lebih kecil digunakan, jumlah nodus akan meningkat yang dimana mengarah kepada perhitungan yang lebih akurat. Masalah struktural meliputi:

- a. Analisis tegangan (*stress*)
- b. Buckling
- c. Analisis getaran

Masalah non-struktural yang ditangani dengan metode elemen hingga meliputi:

- a. Perpindahan kalor dan massa
- b. Mekanika fluida
- c. Distribusi dari potensial listrik dan magnet

Untuk menyelesaikan *differential analysis* pada geometri dan beban yang kompleks, persamaan FEM digunakan. Metode ini menerapkan diskritisasi untuk memperkirakan nilai yang tidak diketahui di setiap titik. Pemodelan sebuah benda dibagi menjadi bagian kecil yang secara keseluruhan mempertahankan sifat objek yang sama dengan benda utuh di subdivisikan (diskritisasi).

2.8.1 Tipe Elemen dan Diskritisasi

FEM atau metode elemen hingga adalah suatu metode dimana struktur yang dianalisis terbagi menjadi bentuk-bentuk lainnya yang dinamakan elemen. Elemen ini dapat mengambil berbagai bentuk seperti linier, segitiga, segiempat, atau tetrahedral.

Elemen dan nodus muncul dari diskritisasi, dengan masing-masing diberi nomor untuk memberikan informasi guna menyusun matriks kekakuan. Menurut Susatio kepada Fauzi (2013), jumlah potongan yang dihasilkan bergantung pada objek geometri yang dianalisa dan bentuk elemen tergantung pada dimensinya.

Proses FEA umumnya terdiri dari tiga tahap:

- a. *Pre-Processing*

Tahap pre-processing merupakan langkah awal sebelum melakukan simulasi. Pada langkah ini pembuatan geometri, penentuan sifat material, pemberian beban, dan boundary conditions diberikan sebagai data input.

- b. *Processing*

Pada tahap ini, analisis numerik dilakukan, di mana perangkat lunak menghasilkan karakteristik elemen (kekakuan) dan karakteristik vektor (beban) dan menggabungkannya menjadi persamaan untuk menentukan nilai nodal dari variabel bidang (perpindahan) dan menghitung *stress* serta regangan hasil.

c. *Post Processing*

Tahap ini berupa penyelesaian masalah yang terkait dengan *displacement* dan *stress*, menyajikan hasil secara numerik dalam format tabel atau secara grafis pada objek yang disimulasikan.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta dengan simulasi kecepatan angin yang berada di daerah Jakarta yaitu 3-10 m/s

3.2 Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Februari – Mei 2025, yang bertepatan pada masa akhir perkuliahan.

3.3 Diagram Alir

Langkah-langkah pada penelitian penelitian ini dapat diringkas sebagai berikut:

1. Mulai

Permulaan dalam penelitian Turbin angin sumbu vertikal

2. Studi Literatur

Dengan mengumpulkan berbagai informasi dan sumber tentang teori Turbin Angin, khususnya jenis H-Rotor Darrieus VAWT. Sumber-sumber ini meliputi jurnal nasional dan internasional, tesis, disertasi, buku, dan referensi online.

3. Spesifikasi Desain

Prosedur perancangan bilah dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu dijelaskan sebagai berikut:

- Tentukan diameter rotor turbin angin berdasarkan spesifikasi generator atau kondisi lingkungan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (3.1)$$

P = Daya Output (Watt)

A = Luas sapuan turbin

ρ = Massa jenis benda (kg/m^3)

V = Kecepatan angin yang dikehendaki (m/s)

- Mengidentifikasi *Tip Speed Ratio* (TSR) untuk turbin angin; untuk turbin skala kecil, TSR biasanya antara 4 dan 8.

- Menentukan jumlah bilah berdasarkan spesifikasi turbin angin atau lingkungan instalasi.
- Memilih airfoil yang sesuai. Data airfoil dapat diperoleh dari simulasi perangkat lunak atau dari Database Koordinat Airfoil UIUC. Airfoil yang lebih tebal umumnya ditempatkan di dekat pangkal (hub) bilah untuk meningkatkan kekuatan.
- Ambil dan verifikasi nilai Koefisien Angkat dan Koefisien Hambatan dari hasil simulasi.
- Menentukan panjang tali busur (*chord*) untuk setiap airfoil
- Bagi bilah menjadi beberapa elemen, biasanya antara 5 hingga 20, atau sesuai kebutuhan.
- Lakukan simulasi untuk menilai karakteristik bilah yang dirancang, yang harus dapat berputar secara efektif pada kecepatan angin rendah sambil bertahan pada kecepatan angin tinggi.
- Melakukan perbandingan dengan desain bilah lainnya dan membuat modifikasi apabila diperlukan.

4. Pemodelan Geometri 2D

Pemodelan geometri 2D adalah langkah awal dari tahap pre-processing simulasi. Fase ini mencakup pengambilan koordinat pada data airfoil. Airfoil NACA 4-digit, khususnya NACA 0012, digunakan untuk koordinat yang dihasilkan melalui persamaan matematis dan perangkat lunak komputer. Model geometri dibuat dengan software Solidworks

5. Proses Simulasi

Tahap ini juga disebut sebagai tahap Penyelesaian, merupakan kelanjutan dari Pre-prosesing. Simulasi yang digunakan melalui software Solidworks, dengan fokus pada solusi formula, model, sifat material, batas kondisi, konvergensi serta penentuan nilai referensi. Penelitian meliputi dua fase simulasi: *steady* dan *unsteady*.

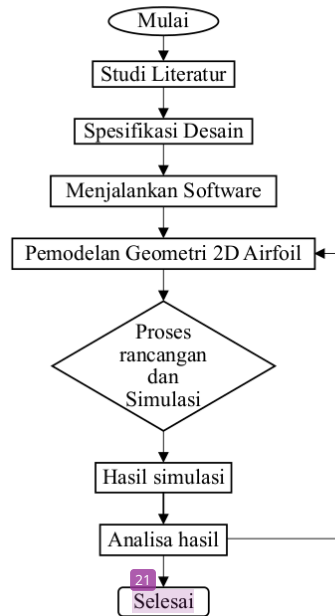
6. Analisis Hasil Simulasi

Hasil simulasi menyajikan tantangan dalam interpretasi, karena terdiri dari nilai variabel seperti kecepatan, tekanan, dan temperatur di titik tertentu. Untuk memungkinkan analisis, hasil ini harus diproses dan dapat ditampilkan sebagai

kurva atau kontur. Tahap Post-processing ini menggunakan Solidworks dan Microsoft Excel.

7. Selesai

Bilah pada turbin telah selesai dibuat simulasinya.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.4 Prosedur Penelitian

Penelitian ini mengikuti tahapan-tahapan berikut:

a. Tahap Pertama

Peneliti mengidentifikasi masalah dan merumuskan isu berdasarkan judul skripsi, serta melakukan tinjauan pustaka tentang analisis tegangan dan perpindahan pada bilah turbin angin yang ada.

b. Tahap Kedua

Peneliti menentukan dimensi dari turbin angin Darrieus yang akan dianalisis, seperti yang dijelaskan dalam Tabel 3.1.

c. Tahap Ketiga

Peneliti menggunakan metode elemen hingga dalam perangkat lunak CAD untuk mensimulasikan dan memperoleh hasil distribusi tegangan dan perpindahan untuk analisis.

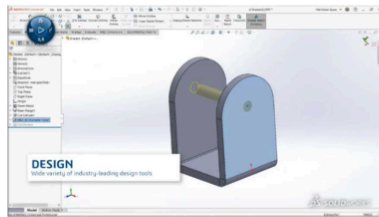
3.5 Spesifikasi Turbin Angin

Tabel 3.1 Spesifikasi Turbin Angin

No	Jenis Turbin	Darrieus H
1	Jenis Axis	Vertical Axis Wind Turbin
2	Diameter	0,96 meter
3	Panjang Chord	30 cm
4	Tinggi Blade	107 cm
5	Material Blade	Kayu Balsa & Alumunium Alloy 1060
6	Jumlah Blade	3 buah
7	Nomor NACA	0012

3.6 Persiapan Software

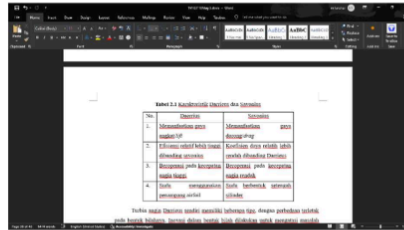
1) Solidworks 2021



Gambar 3.2 Tampilan Solidworks 2021

Solidworks 2021 adalah salah satu software CAD (*Computer Aided Drawing*) yang dapat membantu memodelkan bilah yang sudah dirancang sebelumnya

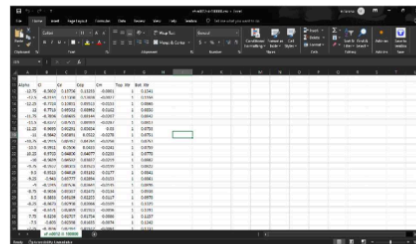
Microsoft Word 2019 adalah software yang dapat berfungsi sebagai pengolah kata



Gambar 3.3 Tampilan Microsoft Office Word 2019

3) Microsoft Excel 2019

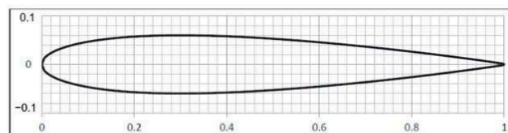
Microsoft Excel 2019 yang berfungsi sebagai software pengolah angka



Gambar 3.4 Tampilan Microsoft Office Excel 2019

3.7 Pemodelan Geometri 2D Airfoil

Pemodelan turbin angin savonius dapat dilihat pada gambar 3.5. Pemodelan turbin angin savonius menggunakan software CAD. Penelitian ini berfokus pada analisis distribusi stress dan displacement pada bilah.



Gambar 3.5 Standard NACA 0012 Airfoil

3.8 Simulasi

Pada tahap ini Peneliti melakukan simulasi kekuatan struktural pada bilah Darrieus sumbu vertikal menggunakan bahan kayu balsa dan aluminium,

khususnya analisis struktural statis. Simulasi ini menilai kapasitas maksimal dari bagian dengan bahan yang ditentukan melalui tiga proses utama: pra-pemrosesan, solusi, dan pasca-pemrosesan. Variasi beban diterapkan untuk menentukan *stress*, *displacement*, dan *safety factor*. Langkah-langkah simulasi meliputi:

- 1) Memilih file model 3D *modelling* dari turbin angin Darrieus H rotor dan membuka tab “*simulation-study*”
- 2) Menamai “*study name*” dan memilih “*static*” sebagai jenis analisis sebelum mengklik OK.
- 3) Memilih bahan untuk di analisis

Tabel 3.2 Sifat mekanik Aluminium

Property	Value	Units
Elastic Modulus	6.9e+10	N/m ²
Poisson's Ratio	0.33	N/A
Shear Modulus	2.7e+10	N/m ²
Mass Density	2700	kg/m ³
Tensile Strength	68935600	N/m ²
Compressive Strength		N/m ²
Yield Strength	27574200	N/m ²
Thermal Expansion Coefficient	2.4e-05	/K

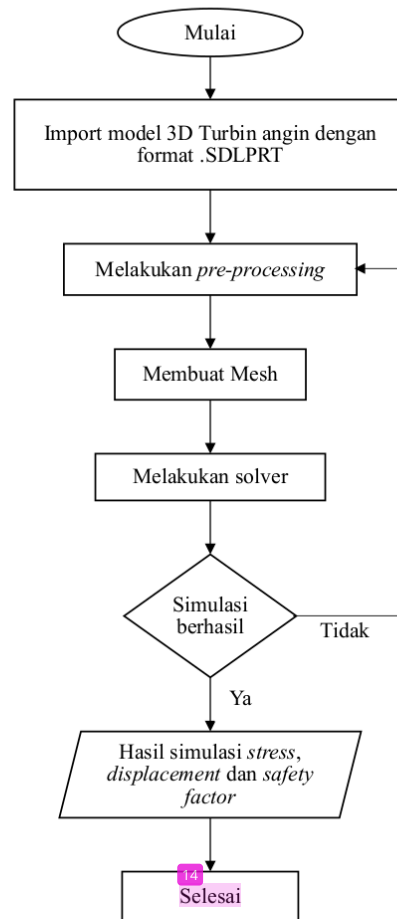
Tabel 3.3 Sifat mekanik Balsa

Property	Value	Units
Elastic Modulus	2999999232	N/m ²
Poisson's Ratio	0.29	N/A
Shear Modulus	299999910.5	N/m ²
Mass Density	159.989899	kg/m ³
Tensile Strength		N/m ²
Compressive Strength		N/m ²
Yield Strength	19999972	N/m ²
Thermal Expansion Coefficient		/K
Thermal Conductivity	0.05	W/(m-K)

Selanjutnya, tentukan arah gaya yang diterapkan pada bilah turbin angin. Gaya bekerja pada area permukaan yang menggunakan nilai gaya normal yang telah ditentukan.

Akhirnya, peroleh nilai deformasi dan tegangan *von misses* berdasarkan kecepatan angin maksimum yang diizinkan untuk desain bilah, dan pastikan faktor keselamatan lebih besar dari 2 untuk mengevaluasi keamanan penggunaan turbin angin darrieus dengan kedua desain bilah.

Langkah-langkah simulasi dapat ditunjukkan dengan gambar 3.6



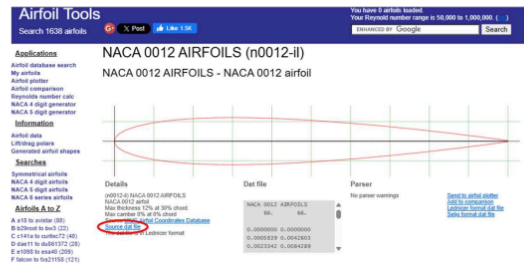
Gambar 3.6 Diagram Proses Simulasi

BAB 4

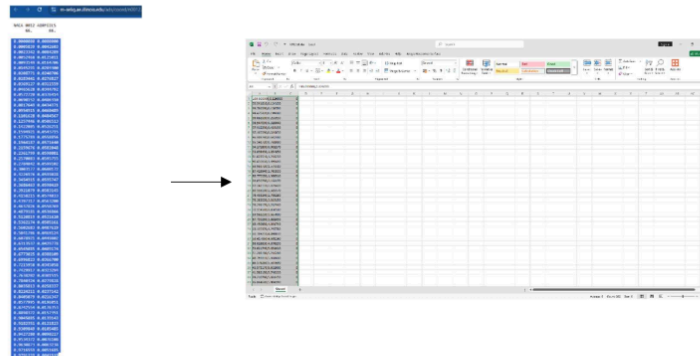
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan bilah NACA 0012

Pemodelan gambar bilah pada turbin angin dapat diambil melalui website “*airfoiltools.com*” dan kemudian dengan memasukkan nilai-nilai koordinat yang ada dari sourcedatfile dengan cara mengcopy dan paste nilai-nilai tersebut ke dalam Microsoft excel, maka didapatkanlah data airfoil untuk di input ke dalam aplikasi solidworks

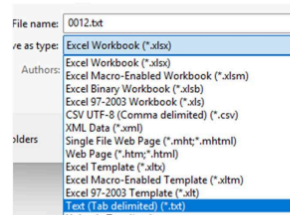


Gambar 4.1 Mengambil data melalui website airfoil



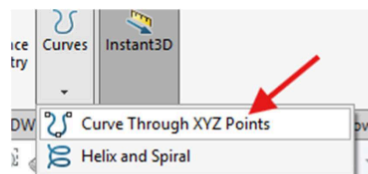
Gambar 4.2 Menginput data ke dalam excel

Seusai menyalin koordinat-koordinat ke dalam excel, setelah itu save dalam bentuk .txt karena solidworks hanya menerima file .sdlcrv dan .txt



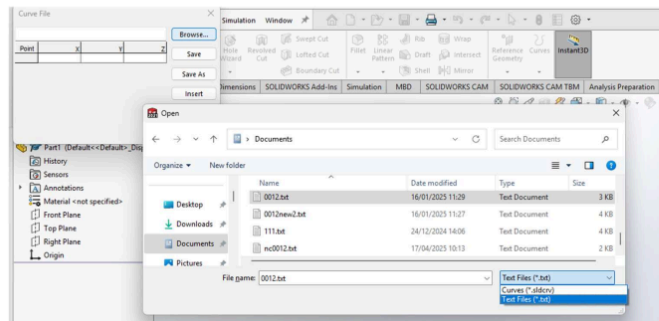
Gambar 4.3 Menyimpan dalam bentuk file .txt

Pada aplikasi solidworks terdapat opsi Curves -> Curve Through XYZ Points, pilihan ini merupakan cara manual untuk menginput model tetapi karena sebelumnya sudah mendapatkan data airfoil yang di save dalam bentuk .txt maka model akan otomatis di gambar pada aplikasi



Gambar 4.4 Open file melalui opsi curve

Dengan begitu akan dapat langsung mencari file airfoil yang sudah menjadi file .txt



Gambar 4.5 Memilih file airfoil yang sudah di isi dengan data-data

Langkah terakhir adalah dengan mengextrude permukaan airfoil pada gambar menjadi model 3D dengan ketentuan panjang bilah 1.07 m dan panjang chord 30cm

4.2 Perhitungan awal

Kapasitas daya maximum turbin angin adalah:

$$P_w = 125 \text{ W}$$

Kecepatan angin untuk dapat mengekstraksi daya tersebut:

$$V_w \text{ (m/s)} = 4 \text{ m/s}$$

Agar stabil, rasio diameter terhadap tinggi blade adalah $\frac{D}{H} = 0.9$, $D = 0.9H$

$$A_{\text{swept}} = \pi \times D \times H = \pi \times 0.9 \times H^2$$

$$P_w = 0.5 \times A_{\text{swept}} \times \rho_{\text{udara}} \times v^3$$

$$125 = 0.5 \times \pi \times 0.9 \times H^2 \times 1.225 \times 4^3$$

$$125 = 109.18 \times H^2$$

Sehingga dapat dihitung,

$$H^2 = (125/109.18)$$

$$H = 1.0699 \text{ m}$$

Maka diameter (D) yang diperoleh yaitu:

$$D = 0.9H$$

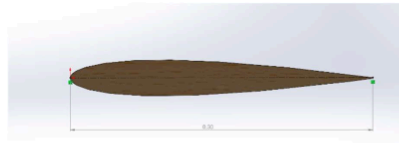
$$D = 0.96 \text{ m}$$

Kemudian dapat dilakukan perhitungan chord. Besarnya nilai solidity untuk penelitian VAWT ini adalah 0.4, maka panjang chord minimum untuk jumlah blade 3 buah dapat diketahui dengan menggunakan rumus:

$$\sigma = NB \times C \times r$$

$$0.4 = 3 \times C \times 0.48$$

$$C = 0.277 \text{ m}$$



Gambar 4.6 Tampak depan airfoil (front plane)



Gambar 4.7 Tampak sumbu x, y, z pada airfoil (isometric)

27 Maka dapat ditentukan bahwa tinggi dari blade, $H = 1.07$ m dan diameter dari VAWT, $D = 0.96$ m. Sehingga $D/H = 0.96/1.07 = 0.89$. Kemudian besarnya luasan sapuan dari bilah adalah:

$$A_{swept} = \pi \cdot R \cdot H$$

$$A_{swept} = \pi \cdot 0,48 \cdot 1,07$$

$$A_{swept} = 1,61 \text{ m}^2$$

Tekanan angin dapat diketahui dengan cara mengkonversi kecepatan angin menggunakan persamaan 2.1. Nilai Torsi pada turbin juga dapat dicari melalui persamaan 2.4. Untuk memenuhi persamaan dan menentukan gaya yang bekerja pada bilah turbin angin, perhitungan tersebut dituliskan sebagai berikut:

13 Perhitungan pada turbin dengan kecepatan angin 4 m/s :

$$\text{Daya : } P = 0,5 \cdot \rho \cdot A_{swept} \cdot C_p \cdot v^3$$

$$P = 0,5 \cdot \frac{1,22}{1} \cdot 1,61 \text{ m}^2 \cdot 0,45 \cdot \left(4 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 = 28,4 \text{ W} = 0,28 \text{ kW}$$

$$\text{Rotasi putaran (n): } n = \frac{60 \lambda V}{\pi 2R}$$

$$n = \frac{60 \cdot 5,4 \text{ m/s}}{\pi \cdot 2,0,48} = 397,88 \text{ RPM}$$

$$\text{Torsi (T)} : T = 9,55 \times \frac{P}{n}$$

$$T = 9,55 \times \frac{28,4}{397,88} = 0,68 \text{ Nm}$$

$$\omega = \frac{P}{T}$$

$$\omega = \frac{28,4}{0,68} = 41,7 \text{ rad/s}$$

$$\text{Gaya: } F = \frac{T}{R}$$

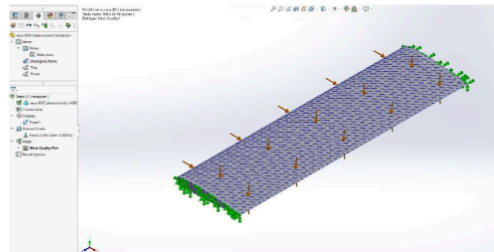
$$F = \frac{0,68 \text{ N.m}}{0,48 \text{ m}} = 1,41 \text{ N}$$

Tabel 4.1 Nilai gaya turbin Darrieus H-Rotor NACA 0012

No	V (m/s)	P (W)	Torsi (N.m)	F(N)	ω	rpm
1	8	227,2	2,72	5,6	83,5	795,7
2	6	95,8	1,53	3,18	62,6	596,8
3	4	28,4	0,68	1,41	41,7	397,88

4.3 Simulasi pada sudu turbin

Proses simulasi yang dilakukan pada penelitian ini ada tiga tahap. Tahap pertama melakukan simulasi dengan satu sudu, dengan tujuan untuk mengetahui material mana yang lebih kuat. Software solidworks digunakan untuk simulasi dalam mengetahui parameter yang diinginkan seperti *von misses stress*, *displacement*, dan *safety factor*.

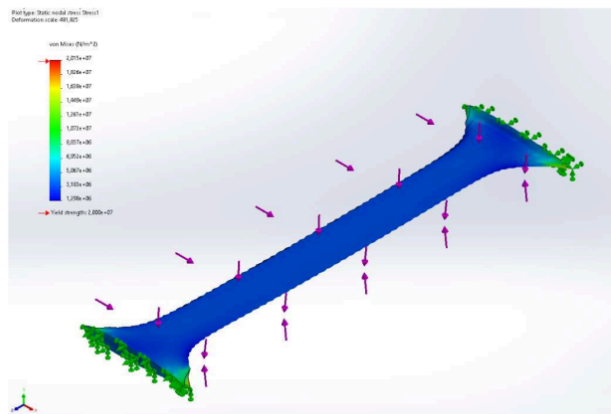


Gambar 4.8 Standard mesh pada airfoil

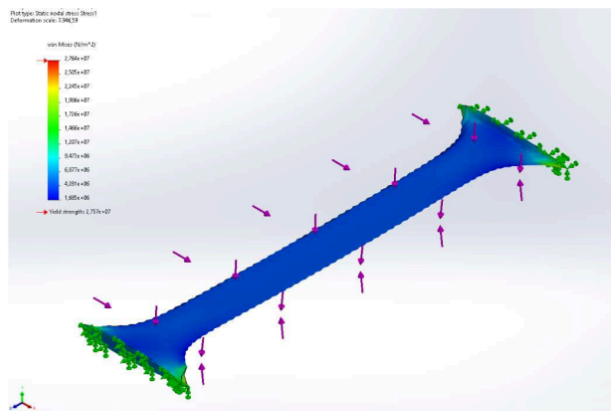
1 Mesh yang digunakan pada simulasi airfoil ini adalah standard mesh, menggunakan bentuk *tetrahedral* dengan jumlah *element mesh* 0.01642884m dan ratio 1.5 seperti pada Gambar 4.8

4.4 Simulasi tegangan *Von misses stress* pada satu sudu

Salah satu tujuan dari penelitian ini adalah meneliti kekuatan bahan material sudu turbin angin darrieus tipe H-rotor. Maka dari itu cara yang pertama adalah *test force* (kekuatan) atau dengan kata lain menguji model turbin dengan diberi beban sebesar x Newton, sampai salah satu dari kedua material mengalami deformasi plastis (*fractured*).



Gambar 4.9 Material Balsa ketika di uji beban sebesar 4.8×10^3 N

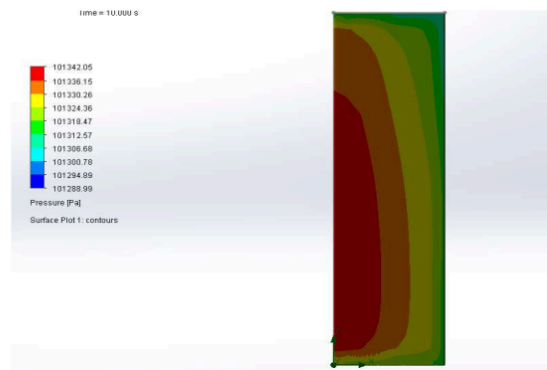


Gambar 4.10 Material Alumunium ketika di uji beban sebesar 8.05×10^3 N

Dari simulasi pertama ini dapat diketahui kekuatan material dengan membagi beban maksimum dari kedua material yaitu 8.05×10^3 N dengan 4.8×10^3 N. Maka hasil yang didapatkan dari simulasi pertama ini adalah bahwa material airfoil berbahan dasar aluminium lebih kuat sebesar 1.67 kali lipat dibanding material berbahan kayu balsa.

4.5 Simulasi Turbin Darrieus tipe H-Rotor

Proses simulasi kedua ini melibatkan simulasi von mises dan displacement dengan menggunakan bahan material yang sudah ditentukan yaitu aluminium. Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui apa yang terjadi saat sudu terkena gaya angin.

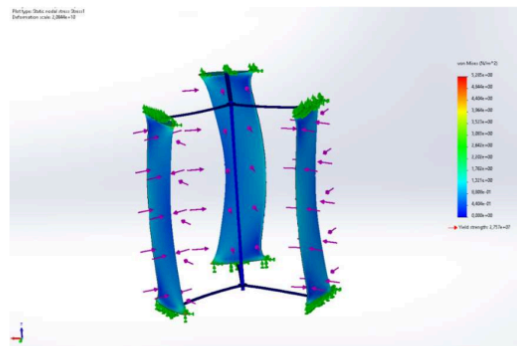


Gambar 4.11 Profil bilah saat terkena angin

56

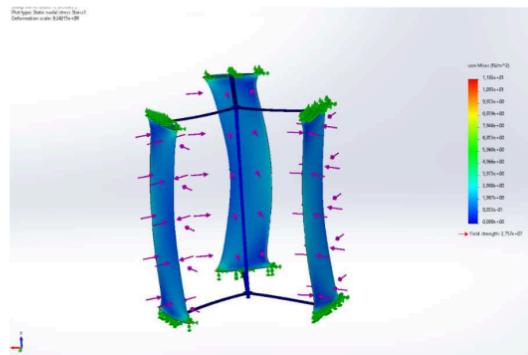
4.5.1 Simulasi *von mises stress* turbin pada material aluminium

Hasil perhitungan pada tabel 4.1 menunjukkan turbin angin Darrieus H-rotor mengalami gaya sebesar 1,41 N saat angin berkecepatan 4 m/s. Dan untuk tegangan Von Mises maksimum pada bilah, ditunjukkan dalam Gambar 4.12. Tegangan yang semakin tinggi ditunjukkan warna yang lebih terang menuju merah dengan nilai yield strength sebesar 27,57 MPa



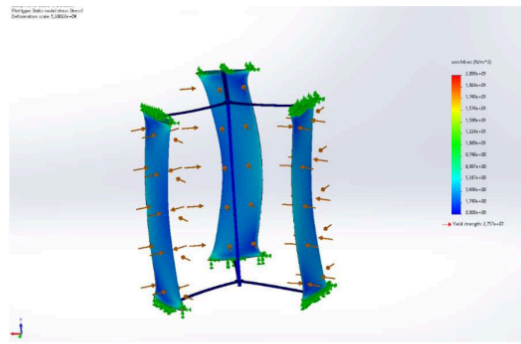
Gambar 4.12 Von misses stress bilah alumunium saat kecepatan angin 4m/s.

Mengonfirmasi bahwa bilah aman pada kecepatan angin ini karena tegangan tersebut di bawah titik luluh material yang digunakan.



Gambar 4.13 Von misses stress bilah alumunium saat kecepatan angin 6m/s.

Untuk kecepatan angin 6m/s turbin angin darrieus tipe H-rotor memiliki gaya sebesar 3,18 N dapat diamati tegangan maksimum *von misses* melalui hasil simulasi statis yang dapat dilihat pada gambar 4.13 dimana distribusi tegangan terbesar ditunjukkan pada warna yang lebih terang menuju merah. Nilai *yield strength* material berada di 27,57 Mpa tetapi dari hasil simulasi didapat sebesar 11,9 MPa. Maka sudu dapat dikatakan aman saat angin maksimum sebesar 6m/s.

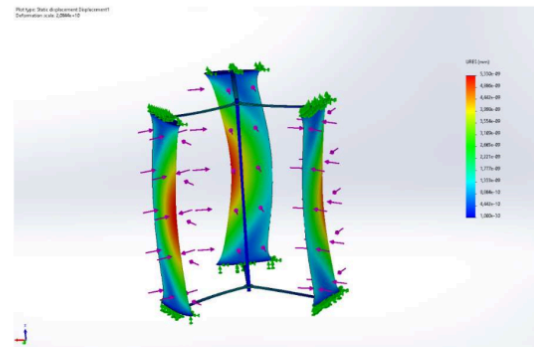


Gambar 4.14 Von mises stress bilah alumunium saat kecepatan angin 8m/s.

Pada kecepatan 8 m/s gaya yang dimiliki adalah sebesar 5,6 N, dari hasil simulasi *static* yang dapat dilihat pada gambar 4.14 didapat sebesar 20,9 MPa, maka sudu dapat dikatakan aman pada kecepatan angin maksimum 8 m/s.

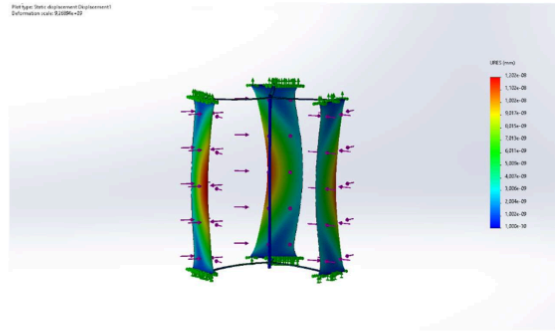
4.5.2 Simulasi *displacement* turbin pada material alumunium

Hasil perhitungan pada table 4.1 menunjukkan gaya sebesar 1,41N pada kecepatan angin sebesar 4m/s dapat diamati displacement yang terjadi pada sudu turbin darrieus tipe h-rotor dari hasil simulasi *static* pada gambar 4.15.



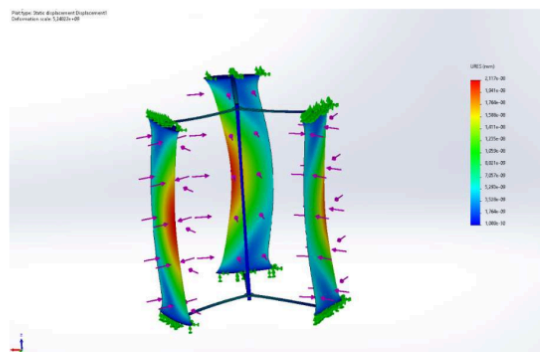
Gambar 4.15 Displacement bilah alumunium yang terjadi saat angin 4m/s.

Displacement ditunjukkan dalam bentuk gradasi warna, warna merah mengalami displacement terbesar dan warna biru mengalami displacement terkecil. Sudu turbin angin berbahan material alumunium mengalami *maximum displacement* pada bagian tengah sudu sebesar 0,05mm.



Gambar 4.16 *Displacement* bilah alumunium yang terjadi saat angin 6m/s.

Pada kecepatan 6 m/s gaya yang dimiliki sebesar 3,18 N. *Displacement* yang terjadi pada sudu turbin dari simulasi statis ditunjukkan pada gambar 4.16. Sudu mengalami *maximum displacement* di bagian tengah sudu sebesar 0,12 mm.

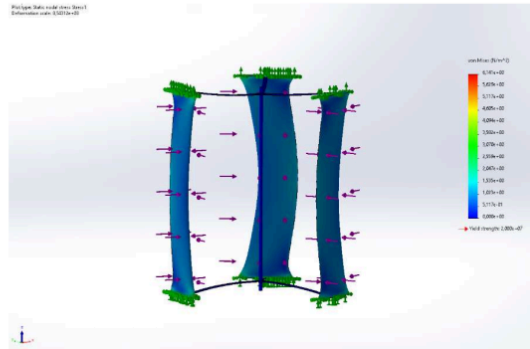


Gambar 4.17 *Displacement* bilah alumunium yang terjadi saat angin 8m/s.

Pada kecepatan 8 m/s memiliki gaya sebesar 5,6 N dapat diamati *displacement* pada sudu turbin dari hasil simulasi *static structure* yang dapat diamati pada gambar 4.18. Sudu turbin mengalami *maximum displacement* pada bagian tengah sudu sebesar 0,21 mm.

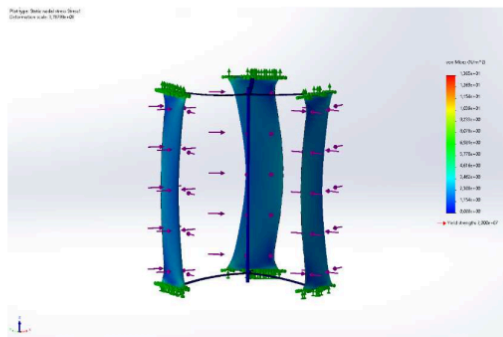
4.5.3 Simulasi *von misses stress* turbin pada material balsa

Hasil perhitungan pada tabel 4.1 menunjukkan turbin angin Darrieus H-rotor mengalami gaya sebesar 1,41 N saat angin berkecepatan 4 m/s.



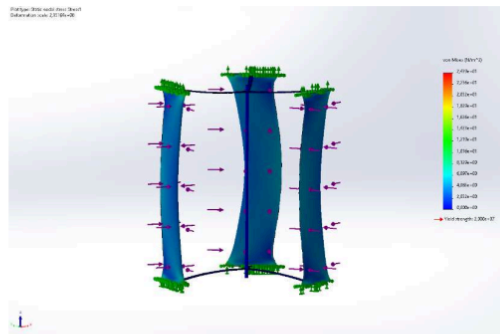
Gambar 4.18 Tegangan *von misses* bilah balsa saat kecepatan angin 4 m/s.

Dan untuk tegangan *von misses* maksimum pada bilah, ditunjukkan dalam Gambar 4.18. Tegangan yang semakin tinggi ditunjukkan warna yang lebih terang menuju merah dengan nilai yield strength sebesar 27,57 MPa, namun dari hasil simulasi didapat tegangan sebesar 6,1 MPa untuk kecepatan angin 4 m/s. maka dapat dikatakan material aman karena di bawah titik luluh.



Gambar 4.19 Tegangan *von misses* bilah balsa saat kecepatan angin 6 m/s.

Pada kecepatan angin 6 m/s, hasil simulasi menunjukkan tegangan hanya 11,9 MPa. Mengonfirmasi bahwa bilah aman pada kecepatan angin ini karena tegangan tersebut masih di bawah titik luluh material yang digunakan.

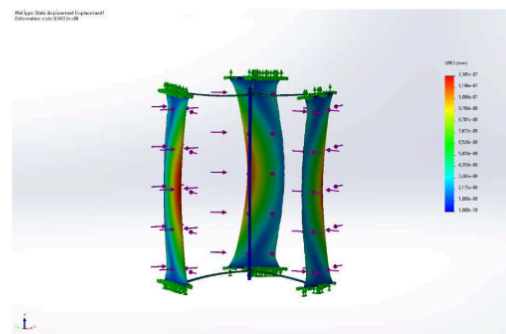


Gambar 4.20 Tegangan *von misses* bilah balsa saat kecepatan angin 8 m/s.

Pada kecepatan 8 m/s gaya yang dimiliki adalah sebesar 5,6 N, dari hasil simulasi *static* yang dapat dilihat pada gambar 4.20 didapat sebesar 24,4 MPa, maka sudu dapat dikatakan tidak aman pada kecepatan angin maksimum 8 m/s.

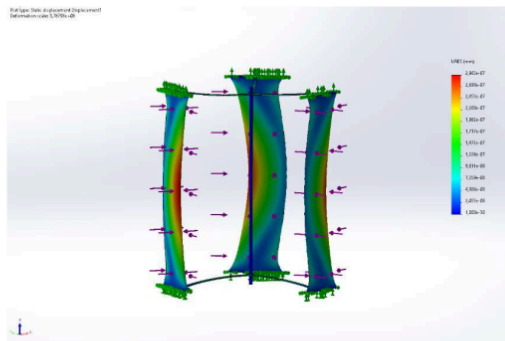
4.5.4 Simulasi *Displacement* Turbin pada material balsa

Hasil perhitungan pada table 4.1 menunjukkan gaya sebesar 1,41N pada kecepatan angin sebesar 4m/s dapat diamati displacement yang terjadi pada sudu turbin darrieus tipe h-rotor dari hasil simulasi *static* pada gambar 4.21



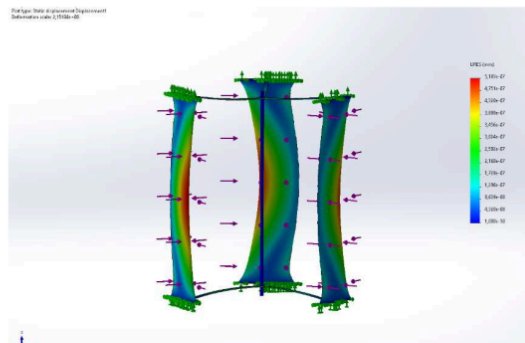
Gambar 4.21 *Displacement* bilah balsa yang terjadi saat angin 4 m/s.

Displacement ditunjukkan dalam bentuk gradasi warna, warna merah mengalami displacement terbesar dan warna biru mengalami displacement terkecil. Sudu turbin angin berbahan material aluminium mengalami *maximum displacement* pada bagian tengah sudu sebesar 1,3 mm



Gambar 4.22 Displacement bilah balsa yang terjadi saat angin 6 m/s.

Pada kecepatan 6 m/s gaya yang dimiliki sebesar 3,18 N. Displacement yang terjadi pada sudu turbin dari simulasi static ditunjukkan pada gambar 4.22. Sudu mengalami *maximum displacement* di bagian tengah sudu sebesar 2,9 mm

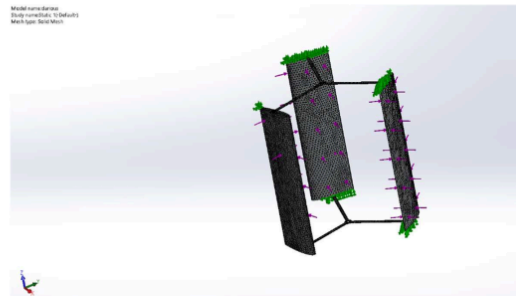


Gambar 4.23 Displacement bilah balsa yang terjadi saat angin 8 m/s.

Pada kecepatan 8 m/s memiliki gaya sebesar 5,6 N dapat diamati displacement pada sudu turbin dari hasil simulasi static structure yang dapat diamati pada gambar 4.18. Sudu turbin mengalami *maximum displacement* pada bagian tengah sudu sebesar 5,1 mm.

4.6 Factor of safety turbin angin

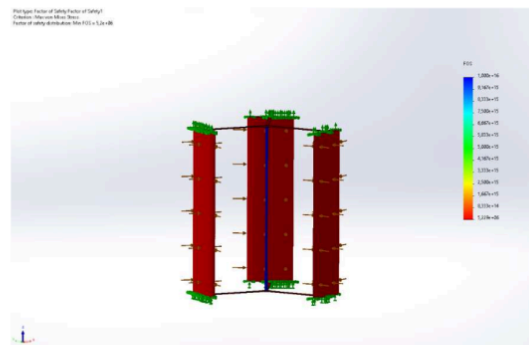
Salah satu step untuk mencari tahu *safety factor* yaitu dimulai dengan cara membuat meshing sebelum melakukan simulasi. Dengan model mesh berbentuk *tetrahedral* serta jumlah *element mesh* 0.01642884m dan ratio 1.5 seperti pada Gambar 4.24



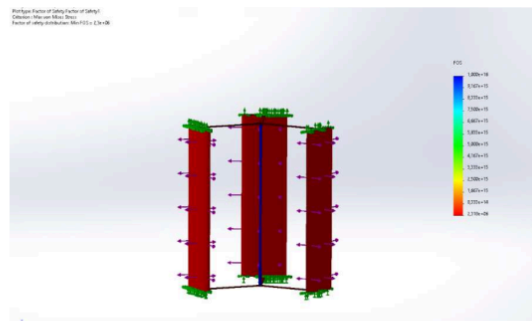
Gambar 4.24 *Standard mesh* tiga sudu airfoil NACA 0012

4.6.1 *Factor of safety* pada sudu berbahan alumunium

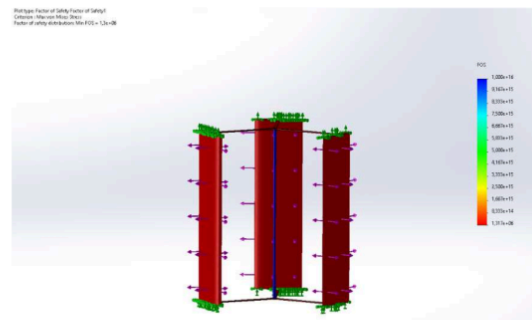
Hasil dari faktor keamanan pada bilah turbin darrieus tipe H-rotor saat kecepatan angin sebesar 4 m/s, 6 m/s, dan 8 m/s ditampilkan dengan data visual berupa gradasi warna, dimana warna biru menunjukkan faktor keamanan maksimal dan warna merah menunjukkan minimal faktor keamanan pada sudu turbin angin. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.25 hingga gambar 4.27



Gambar 4.25 *Safety factor* turbin material alumunium kecepatan angin 4m/s.



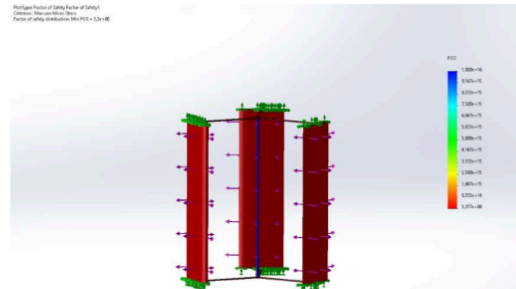
Gambar 4.26 *Safety factor* turbin material alumunium kecepatan angin 6m/s.



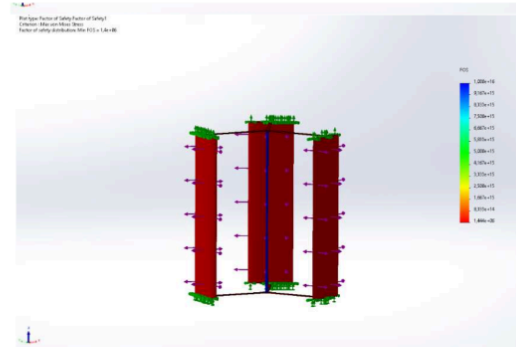
Gambar 4.27 *Safety factor* turbin material alumunium kecepatan angin 8m/s.

4.6.2 *Factor of safety* pada sudu berbahan balsa

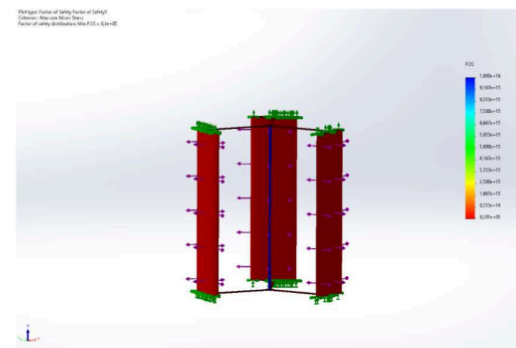
Hasil dari faktor keamanan pada bilah turbin darrieus tipe H-rotor saat kecepatan angin sebesar 4 m/s, 6 m/s, dan 8 m/s ditampilkan dengan data visual berupa gradasi warna, dimana warna biru menunjukkan faktor keamanan maksimal dan warna merah menunjukkan minimal faktor keamanan pada sudu turbin angin. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.28 hingga gambar 4.30



Gambar 4.28 *Safety factor* turbin material balsa kecepatan angin 4m/s.



Gambar 4.29 *Safety factor* turbin material balsa kecepatan angin 6m/s.

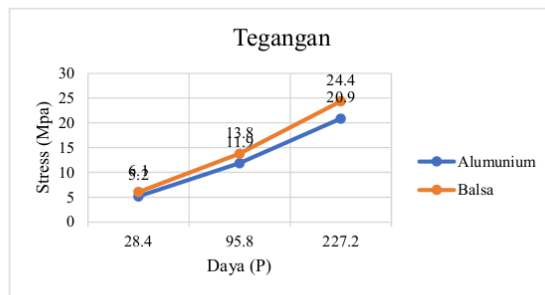


Gambar 4.30 *Safety factor* turbin material balsa kecepatan angin 8m/s

4.7 Analisis Tegangan (*von misses*) pada sudu turbin angin

Distribusi Tegangan (*von misses*) pada sudu turbin angin darrieus tipe H-rotor memiliki pengaruh terhadap kekuatan turbin. Data hasil simulasi tegangan (*von misses stress*) pada sudu angin berbahan dasar alumunium dengan kecepatan angin 4m/s, 6 m/s, dan 8 m/s dimana pada setiap kecepatan angin memiliki distribusi tegangan maksimal sebesar 20,9 MPa, 11,9 MPa, dan 5,2 MPa. Dibandingkan pada sudu angin berbahan kayu balsa dengan kecepatan angin yang sama yaitu 4m/s, 6m/s, dan 8m/s dimana pada setiap kecepatan angin memiliki distribusi tegangan maksimal sebesar 24,4 MPa, 13,8 MPa, dan 6,1 MPa.

Dari hasil yang didapatkan menunjukkan perbedaan tegangan maksimum pada sudu turbin angin berbahan alumunium dan kayu balsa. Perbandingan tegangan maksimal pada masing-masing desain sudu turbin dapat diamati pada diagram hasil pada gambar 4.31.

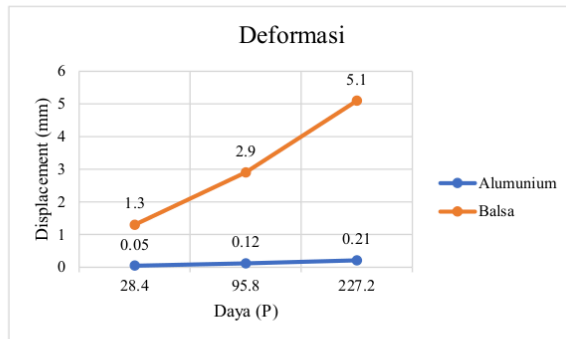


Gambar 4.31 Diagram perbandingan *von misses stress* pada sudu turbin.

Berdasarkan gambar diagram 4.31 turbin angin dengan bahan balsa memiliki nilai tegangan maximum paling besar senilai 24,4 MPa pada saat kecepatan angin 8 m/s dan daya 227,2 W namun melebihi batas izin kekuatan luluh (*yield strength*) dari sifat material kayu balsa sebesar 20 MPa. Sehingga material kayu balsa tidak dapat dikatakan aman pada kecepatan angin 8m/s dan daya 227,2 W. Dengan demikian hasil simulasi menunjukkan selain pada bertambahnya nilai daya dan torsi, desain sudu darrieus tipe H memiliki pengaruh terhadap besarnya distribusi tegangan yang diterima sudu angin savonius yang dapat mempengaruhi pemilihan desain sudu yang optimal.

4.8 Analisis deformasi (*displacement*) pada sudu turbin angin

Deformasi (*displacement*) berlebihan pada bilah dapat merusak simetri turbin angin dan rotasi yang terus menurun akibat dari bilah yang telah berdeformasi akan menyebabkan gaya yang tidak seimbang yang mana akan menyebabkan kerusakan lebih parah pada turbin angin (Su Tian, et al, 2022). Maka dari itu, analisis ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui besar nilai deformasi terbesar pada sudu turbin angin darrieus pada kecepatan angin sebesar 4 m/s, 6 m/s, dan 8 m/s. Hasil yang ditunjukkan dari simulasi deformasi (*displacement*) pada sudu turbin yaitu berupa daerah yang mengalami perubahan bentuk atau adanya perubahan jarak dari suatu daerah yang dikenakan gaya yang terjadi pada sudu turbin angin darrieus tipe H-rotor.



Gambar 4.32 Diagram perbandingan *displacement* pada kedua material.

Pada gambar 4.32 turbin angin yang menggunakan material balsa mengalami deformasi tertinggi dengan perubahan jarak sebesar 5,1 mm pada angin 8 m/s, untuk turbin angin berbahan aluminium deformasi tertinggi yang terjadi sebesar 0,21 mm pada kecepatan angin 8 m/s. Terdapat fenomena dimana desain sudu turbin angin berbahan aluminium memiliki deformasi yang lebih kecil dibanding dengan desain sudu turbin angin dengan bahan kayu, hal ini diakibatkan material berbahan dasar aluminium merupakan material ulet (*ductile*) sedangkan turbin dengan bahan balsa merupakan material getas (*brittle*). Dari hasil simulasi tegangan material balsa melebihi tegangan luluh material yang digunakan, maka desain sudu turbin angin darrieus berbahan kayu tersebut dapat mengalami deformasi plastis. Deformasi plastis perubahan bentuk suatu material yang bersifat permanen, artinya material tersebut tidak akan kembali ke bentuk asalnya setelah

gaya yang menyebabkan deformasi dihilangkan. Dengan demikian, dari kedua desain sudu yang dapat lebih optimal digunakan adalah desain sudu dengan bahan aluminium dikarenakan desain tersebut memiliki deformasi yang lebih rendah.

4.9 Analisis Faktor Keamanan (*safety factor*) pada sudu turbin angin

Dalam mendesain, faktor keamanan (*safety factor*) merupakan sebuah nilai yang digunakan untuk menentukan kualitas dan kelayakan sebuah desain. Pada desain sudu turbin angin darrieus tipe H-rotor dapat diketahui nilai dari *safety factor* pada saat simulasi dimana sudu angin menerima gaya dari kecepatan angin sebesar 4 m/s, 6m/s, dan 8m/s. Dari hasil simulasi didapat angka *safety factor* dari desain berbahan aluminium sebesar 5,2 pada kecepatan angin 4 m/s, 2,3 pada kecepatan angin 6 m/s, dan 1,3 pada kecepatan 8 m/s. sedangkan desain sudu berbahan balsa sebesar 3,3 pada kecepatan angin 4m/s, 1,4 pada kecepatan angin 6 m/s, dan 0,8 pada kecepatan angin 8 m/s. Sehingga dapat dikatakan kedua desain sudu turbin angin akan berbahaya ketika diletakan pada lokasi dengan rata-rata kecepatan angin 8 m/s dikarenakan nilai *safety factor* pada desain tersebut <2 dan dapat dilihat desain sudu berbahan balsa sudah kurang aman meski pada kecepatan angin sebesar 6m/s tetapi nilai *safety factor* menunjukan angka 1,4 yang berarti <2. Sehingga dapat dipahami bahwa desain sudu berbahan aluminium lebih aman digunakan karena memiliki *safety factor* yang lebih tinggi. Nilai tersebut ditampilkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Nilai *safety factor* sudu turbin

Desain sudu	Kec. Angin	Safety factor
Aluminium	4 m/s	5,2
	6 m/s	2,3
	8 m/s	1,3
Balsa	4 m/s	3,3
	6 m/s	1,4
	8 m/s	0,8

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukannya simulasi statis pada bilah material dengan software solidworks. Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil analisa adalah:

1. Material dari sudu turbin angin berpengaruh terhadap distribusi tegangan (*stress*) dan deformasi (*displacement*) pada turbin angin. Desain turbin angin berbahan alumunium memiliki nilai yang lebih optimal namun gaya yang diterima pun lebih besar sehingga menyebabkan distribusi tegangan yang terjadi dan *safety factor* lebih besar meskipun memiliki deformasi yang lebih kecil.
2. Sudu dengan material balsa mengalami kondisi tegangan *von misses* yang lebih besar di kecepatan angin 4 dan 6 m/s. Namun, pada saat angin berkecepatan 8 m/s nilai tegangan melebihi batas titik luluh (*yield strength*) sehingga material dapat mengalami deformasi plastis, yaitu perubahan bentuk suatu material secara permanen. Dari dua bilah material, yang optimal saat digunakan yaitu desain sudu dengan bahan dasar alumunium hal ini dapat dilihat dari *displacement* yang terjadi pada bilah alumunium jauh lebih kecil dibanding balsa. Kedua material dari sudu turbin ini telah dilakukan simulasi tegangan *von misses* saat kecepatan angin masing-masing berbeda.
3. Pada hasil simulasi ditunjukkan FOS (*Factor of safety*) pada kedua sudu turbin darrieus H-rotor
 - Angin berkecepatan 3-6 m/s dapat dikatakan aman karena memenuhi batas minimalnya yaitu >2
 - Turbin berbahan balsa dapat dikatakan tidak aman, dikarenakan memiliki *safety factor* dibawah >2 yaitu bernilai 1,4.
 - Pada masing-masing material, bilah dapat dikatakan tidak aman untuk digunakan pada kondisi kecepatan angin 8 m/s

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya mengenai bahan sudu turbin angin Darrieus adalah sebagai berikut:

1. Analisis yang dilakukan dalam studi ini membatasi gaya dan torsi yang diterima oleh poros turbin angin Darrieus sebagai fokus utama. Oleh karena itu, analisis selanjutnya dapat dikembangkan untuk mencakup gaya dan torsi yang terjadi pada poros turbin, sehingga memberikan pemahaman yang lebih lengkap.
2. Analisis stres simulasi hanya berfokus pada simulasi statis, sehingga fenomena yang diperoleh kurang akurat. Disarankan untuk melakukan simulasi dinamis guna mendapatkan hasil yang lebih tepat terkait bahan sudu turbin Darrieus tipe H-rotor.
3. Analisis ini hanya dilakukan dengan menggunakan dua bahan sebagai lingkup studi. Penelitian selanjutnya harus mempertimbangkan mengeksplorasi bahan yang berbeda untuk menghasilkan variasi hasil yang lebih beragam.

DAFTAR PUSTAKA

- Capecchi, D., Ruta, G., “*Strength of Materials and Theory of Elasticity in 19th Century Italy*”, 2015
- Urone, P., Hinrichs, R., Dirks, K., & Sharma, M. *College physic by OpenStax*, University of Central Florida, Orlando, Florida; 2016
- Cooper P., Kosasih P., Ledo L., *Roof mounting site analysis for micro-wind turbines*, Renewable Energy 2010; 36:1379-1391.
- Hirahara H., Hossain M., Nonomura Y., *Testing basic performance of a very small wind turbine designed for multi – purposes*, Renewable Energy 2005; 30: 1279 – 1297.
- Ozgener O., Ozgener L. *Energy and reliability analysis of wind turbine systems: a case study*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2007; 11:1811–1826.
- Fasel H., Gross A., *Numerical Investigation of Different Wind Turbine Airfoils*, the University of Arizona, Tucson; 2011.
- Mayer C., Bechly M., Hampsey M., and Wood D. *The starting behavior of a small horizontal-axis wind turbine*, Renewable Energy 2001; 22:411-417.
- International Renewable Energy Agency Paper., *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series*; 2012
- Ahmad Hemami, 2012. *Wind Turbine Technology*. New York: Cengage Learning
- Mojtaba Ahmadi-Baloutaki, R. Cariveau, and David S.-K. Ting, “*Straight-bladed vertical axis wind turbine rotor design guide based on aerodynamic performance and loading analysis*,” vol. 228, no. 7, pp. 742–759, Jun. 2014
- Biadgo, A.M., Simonovic, A., Komarov, D. & Stupar, S., 2013. Numerical and Analytical Investigation of Vertical Axis Wind Turbine. FME Transactions, vol. 41, No 1
- Ebobi, O., 2013. The Influence of Blade Chord on the Aerodynamics and Performance of Vertical Axis Wind Turbines. Thesis, The University of Sheffield
- Ahmed, Mahmoud & Abdel Gawad, Ahmed., 2016. *Utilization of Wind Energy in Green Buildings*.
- Anonim, 2015. *Dasar-dasar Perancangan Bilah*. PT. Lentera Angin Nusantara

Lammirta dan Tediato, 2018. Analisis Tegangan dan Defleksi pada Balok Kastela dengan Bukan Rhomb Menggunakan Metode Elemen Hingga, Jurnal Mitra Teknik Sipil, hlm 55-64.

Hidayat, M.F. (2014) 'Analisa Aerodinamika Airfoil NACA 0012 Dengan ANSYS Fluent, Analisa Aerodinamika Airfoil NACA 0021 Dengan Ansys Fluent, 10(2), pp. 83–92.

Salafudin, H. (2015). Desain Dan Analisis Kekuatan Pada Rangka Kendaraan Jenis Prototype Sesuai Standar Shell Eco Marathon Asia. 20

<https://www.applicadindonesia.com/solidworks/>

Dokumen pribadi penyusun

ANALISIS KEKUATAN BILAH TURBIN ANGIN DARRIEUS H- ROTOR MENGGUNAKAN AIRFOIL NACA 0012

ORIGINALITY REPORT

16%

SIMILARITY INDEX

15%

INTERNET SOURCES

3%

PUBLICATIONS

5%

STUDENT PAPERS

Rizkiyda

PRIMARY SOURCES

1

repository.itl.ac.id

Internet Source

2%

2

repository.its.ac.id

Internet Source

2%

3

123dok.com

Internet Source

1%

4

Submitted to Universitas Negeri Jakarta

Student Paper

1%

5

jurnal.ukmpenelitianuny.org

Internet Source

1%

6

text-id.123dok.com

Internet Source

1%

7

Submitted to Universitas Jenderal Achmad
Yani

Student Paper

<1%

8

docplayer.info

Internet Source

<1%

9

edoc.pub

Internet Source

<1%

10

Submitted to Universitas Gadjah Mada

Student Paper

<1%

11

repository.ub.ac.id

Internet Source

<1 %

12 www.scribd.com
Internet Source

<1 %

13 eprints.ums.ac.id
Internet Source

<1 %

14 Submitted to Universitas Diponegoro
Student Paper

<1 %

15 ejurnal.undana.ac.id
Internet Source

<1 %

16 fr.scribd.com
Internet Source

<1 %

17 Jericho Mongkol, Stenly Tangkuman, Irvan Rondonuwu. "PERANCANGAN STRUKTUR MENARA LATTICE UNTUK TURBIN ANGIN DARRIEUS TIPE-H DAYA KECIL", Jurnal Poros Teknik Mesin UNSRAT, 2024
Publication

<1 %

18 repository.poltekbangplg.ac.id
Internet Source

<1 %

19 repository.usu.ac.id
Internet Source

<1 %

20 repository.usd.ac.id
Internet Source

<1 %

21 eprints.polsri.ac.id
Internet Source

<1 %

22 library.binus.ac.id
Internet Source

<1 %

23 nanopdf.com
Internet Source

<1 %

24 repository.unej.ac.id
Internet Source

<1 %

25 Submitted to Sriwijaya University
Student Paper

<1 %

26 ejurnal.its.ac.id
Internet Source

<1 %

27 journals.ums.ac.id
Internet Source

<1 %

28 jurnal.unimus.ac.id
Internet Source

<1 %

29 journal.uta45jakarta.ac.id
Internet Source

<1 %

30 Submitted to Universitas Pancasila
Student Paper

<1 %

31 eprints.umm.ac.id
Internet Source

<1 %

32 Submitted to Institut Teknologi Kalimantan
Student Paper

<1 %

33 scholar.unand.ac.id
Internet Source

<1 %

34 jurnal.sttkd.ac.id
Internet Source

<1 %

35 jurnalteknik.janabadra.ac.id
Internet Source

<1 %

36 talenta.usu.ac.id
Internet Source

<1 %

37	cerdasco.com Internet Source	<1 %
38	core.ac.uk Internet Source	<1 %
39	journal.unesa.ac.id Internet Source	<1 %
40	repository.umsu.ac.id Internet Source	<1 %
41	adoc.pub Internet Source	<1 %
42	dhkangmas.com Internet Source	<1 %
43	ejournal.unesa.ac.id Internet Source	<1 %
44	idoc.tips Internet Source	<1 %
45	Submitted to itera Student Paper	<1 %
46	repository.ipb.ac.id Internet Source	<1 %
47	www.openjournal.unpam.ac.id Internet Source	<1 %
48	www.volontegenerale.nl Internet Source	<1 %
49	Nur Asyik Hidayatullah, Hanifah Nur Kumala Ningrum. "Optimalisasi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin Turbin Sumbu Horizontal dengan Menggunakan Metode Maximum Power Point Tracker", JEECAE (Journal of	<1 %

Electrical, Electronics, Control, and Automotive Engineering), 2017

Publication

50	jurnal.untad.ac.id Internet Source	<1 %
51	lib.unnes.ac.id Internet Source	<1 %
52	nusaengineering.com Internet Source	<1 %
53	repository.unair.ac.id Internet Source	<1 %
54	repository.upnvj.ac.id Internet Source	<1 %
55	rp2u.unsyiah.ac.id Internet Source	<1 %
56	vdocuments.site Internet Source	<1 %
57	journal.upp.ac.id Internet Source	<1 %
58	repository.polman-babel.ac.id Internet Source	<1 %
59	repository.trisakti.ac.id Internet Source	<1 %
60	repository.uinjkt.ac.id Internet Source	<1 %
61	www.coursehero.com Internet Source	<1 %
62	Muhammad Hasan Basri, Djaman .. "RANCANG BANGUN DAN DESAIN	<1 %

PROTOTYPE PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU MODEL SAVONIOUS", JURNAL SIMETRIK, 2019

Publication

63

eprints.unram.ac.id

Internet Source

<1 %

64

instak.wordpress.com

Internet Source

<1 %

65

repository.iainpurwokerto.ac.id

Internet Source

<1 %

Exclude quotes On

Exclude matches Off

Exclude bibliography On