

**Pengembangan Dinamometer Generator DC dan Pengujian  
Performansi Model Turbin Angin Tipe Poros Silang  
Kapasitas 10 W**

**SKRIPSI**

**Disusun oleh:  
Yudi Setiadi  
163030057**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS PASUNDAN  
BANDUNG  
2023**

## SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Yudi Setiadi  
Nomor Pokok Mahasiswa : 163030057  
Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Dalam Skripsi yang saya kerjakan ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan/ditulis oleh orang lain untuk memperoleh gelar dari suatu perguruan tinggi,
2. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu/dikutip/disitasi dalam naskah ini dan disebutkan dalam referensi,
3. Naskah laporan skripsi yang ditulis bukan dilakukan secara *copy paste* dari karya orang lain dan mengganti beberapa kata yang tidak perlu,
4. Naskah laporan skripsi bukan hasil *plagirism*.

Apabila dikemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar maka saya sanggup menerima hukuman/sanksi apapun sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 24 Juni 2023

Penulis



Yudi Setiadi

## SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini, sebagai sivitas akademik Universitas Pasundan, saya

Nama : Yudi Setiadi

NPM : 163030057

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Jenis Karya : Skripsi

Menyatakan bahwa sebagai pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, saya menyetujui memberikan kepada Universitas Pasundan Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

### **Pengembangan Dinamometer Generator DC dan Pengujian Performansi Model Turbin Angin Tipe Poros Silang Kapasitas 10 W**

Beserta perangkat yang ada (jika ada). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pasundan berhak menyimpan mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pakaian data (*database*), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencatumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Bandung, 24 Juni 2023

Yang menyatakan,



Yudi Setiadi

## LEMBAR PENGESAHAN

### Pengembangan Dinamometer Generator DC dan Pengujian Performansi Model Turbin Angin Tipe Poros Silang Kapasitas 10 W



Nama : Yudi Setiadi

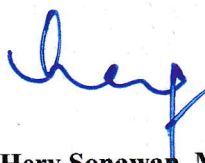
NPM : 163030057

Pembimbing Utama



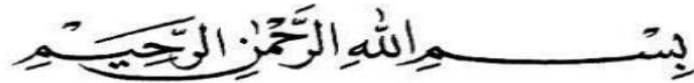
Ir. Endang Achdi, M.T.

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. Hery Sonawan, M.T.

## KATA PENGANTAR



Berkat rahmat dan petunjuk Allah SWT, penulis dengan ini berhasil menyelesaikan Laporan Skripsi berjudul “Pengembangan Dinamometer Generator DC dan Pengujian Model Turbin Angin Tipe Poros Silang Kapasitas 10 W” sebagai syarat untuk menuntaskan Pendidikan tingkat Strata-1 dalam Program Studi Teknik Mesin di Universitas Pasundan.

Dalam prosesnya, penulis mendapatkan dukungan dari banyak pihak. Maka penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Allah SWT atas karunia-Nya yang memberikan kelancaran dan kesehatan dalam pembuatan laporan ini.

1. Terima kasih, Ayahanda Uud Sahudi dan ibunda Siti Suryati, atas doa dan semangat yang telah diberikan dalam segala aspek, baik moril maupun materi.
2. Juga, terima kasih kepada Wawan Sugianto dan Ina Marlina, kakak penulis, atas doa dan semangat yang selalu diberikan.
3. Tak lupa, penghargaan kepada Ir. Endang Achdi, M.T. sebagai pembimbing utama, yang telah memberikan ilmu berharga, pengarahan, saran, motivasi, serta bimbingan selama ini.
4. Tentu saja, juga berterima kasih kepada Dr. Ir. Herry Sonawan, M.T. sebagai pembimbing pendamping, yang telah memberikan ilmu berharga, pengarahan, saran, motivasi, serta bimbingan selama ini.
5. Tidak lupa, ucapan terima kasih kepada seluruh rekan angkatan 2016 Program Studi Teknik Mesin yang selalu memberikan semangat.
6. Terakhir, ucapan terima kasih kepada seluruh pihak yang membantu dan memberikan saran dan dukungan kepada penulis. Semuanya telah berkontribusi dalam menyelesaikan laporan skripsi ini.

Akhir kata, semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan juga para pembaca serta pihak-pihak yang membutuhkannya. Semoga hasil dari penelitian ini dapat menjadi sumbangan positif dan berguna bagi perkembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik mesin atau bidang terkait.

Bandung, 24 Juni 2023

Yudi Setiadi

# DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN .....	i
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL .....	ix
ABSTRAK .....	x
<i>ABSTRACT</i> .....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar Belakang.....	1
2. Rumusan Masalah.....	1
3. Tujuan.....	2
4. Manfaat.....	2
5. Batasan Masalah .....	2
6. Sistematika Penulisan .....	2
BAB II STUDI LITERATUR.....	4
1. Turbin Angin .....	4
2. Klasifikasi Turbin Angin .....	4
3. Persamaan Pada Turbin Angin.....	6
4. Dinamometer .....	9
5. Jenis-Jenis Dinamometer .....	10
6. Beban Listrik .....	11
7. Mikrokontroler.....	13
8. <i>Riview</i> Jurnal .....	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	20
1. Tahapan Penelitian.....	20
2. Penjelasan Tahapan Penelitian.....	21
3. Tempat Penelitian .....	21
BAB IV PENGEMBANGAN DAN PENGUJIAN .....	22

1. Pengembangan Dinamometer Generator DC .....	22
2. <i>Setup</i> Pengujian .....	23
3. Prosedur Pengujian .....	24
5. Pengujian .....	25
6. Pembahasan .....	32
7. Analisis .....	37
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	41
1. Kesimpulan.....	41
2. Saran.....	41
DAFTAR PUSTAKA.....	42
LAMPIRAN .....	45
1. Data Pengujian.....	45
2. Foto-Foto Kegiatan.....	46

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) [9] .....	4
Gambar 2 Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) [17] .....	5
Gambar 3 Turbin Angin Sumbu Silang (TASS) [2].....	6
Gambar 4 Skema Dinamometer [25] .....	9
Gambar 5 <i>Frictional (Prony Break) Dynamometer</i> [25].....	10
Gambar 6 <i>Hydraulic Dynamometer</i> [25] .....	10
Gambar 7 <i>Generator type Dynamometer</i> [25] .....	11
Gambar 8 <i>Eddy Current Dynamometer</i> [25].....	11
Gambar 9 Gelombang Listrik Beban Resistif [31].....	12
Gambar 10 Gelombang Listrik Beban Induktif [31].....	12
Gambar 11 Gelombang Listrik Beban Kapasitif [31] .....	13
Gambar 12 <i>Board</i> Arduino UNO R3 [32].....	13
Gambar 13 Metodologi Penelitian .....	20
Gambar 14 Dinamometer Generator Kapasitas 40 W .....	22
Gambar 15 Resistor [32].....	22
Gambar 16 Rantai dan Roda Gigi Sproket.....	23
Gambar 17 <i>Setup</i> Pengujian.....	23
Gambar 18 Grafik Kecepatan Putar Poros Turbin Terhadap Waktu .....	35
Gambar 19 Grafik Kecepatan Putar Poros Turbin Terhadap Waktu .....	35
Gambar 20 Grafik Kecepatan Putar Poros Turbin Terhadap Waktu .....	36
Gambar 21 Grafik $C_p$ Terhadap TSR .....	36
Gambar 22 Grafik $C_p$ Terhadap TSR .....	37
Gambar 23 Grafik $C_p$ Terhadap TSR .....	37
Gambar 24 Data Pengujian Menggunakan Beban 10 (Sepuluh) dan Beban 11 (Sebelas) .....	38
Gambar 25 Gaya yang Bekerja pada Turbin Angin .....	39
Gambar 26 Data Hasil Pengujian yang Terekap oleh Arduino .....	45
Gambar 27 Instalasi Pengujian .....	46
Gambar 28 Terowongan Angin ( <i>Wind Tunnel</i> ).....	46
Gambar 29 Pelumasan Sistem Transmisi Daya .....	47
Gambar 30 Sensor Kecepatan Putaran.....	47
Gambar 31 <i>Setup</i> Mikrokontroler .....	48
Gambar 32 Mengatur Sudut <i>Pitch</i> Sudu Horizontal Menggunakan Busur Derajat .....	48
Gambar 33 Tampilan <i>Display</i> Mikrokontroler.....	49
Gambar 34 Mengatur Beban Listrik .....	49
Gambar 35 Mengatur Frekuensi Inverter.....	50



Gambar 36 Tempat <i>SD Card</i> Pada Mikrokontroler .....	50
Gambar 37 Proses Pengambilan Data.....	51

## DAFTAR TABEL

Tabel 1 Spesifikasi Arduino UNO R3 .....	14
Tabel 2 <i>Preliminary Test on Cross Axis Wind Turbine</i> .....	15
Tabel 3 <i>Design and Early Development of a Novel Cross Axis Wind Turbine</i> .....	16
Tabel 4 <i>Design and Testing of a Novel Building Integrated Cross Axis Wind Turbine</i> .....	17
Tabel 5 Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin <i>Savonius type L</i> .....	18
Tabel 6 Pengaruh Sudut <i>Pitch</i> pada <i>Blade</i> Terhadap Kinerja Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe <i>Darrieus-H NACA 3412</i> .....	19
Tabel 7 Data Pengujian pada Sudut <i>Pitch</i> Sudu 20° .....	25
Tabel 8 Data Pengujian pada Sudut <i>Pitch</i> Sudu 20° .....	26
Tabel 9 Data Pengujian pada Sudut <i>Pitch</i> Sudu 20° .....	26
Tabel 10 Data Pengujian pada Sudut <i>Pitch</i> Sudu 25° .....	27
Tabel 11 Data Pengujian pada Sudut <i>Pitch</i> Sudu 25° .....	27
Tabel 12 Data Pengujian pada Sudut <i>Pitch</i> Sudu 25° .....	28
Tabel 13 Data Pengujian pada Sudut <i>Pitch</i> Sudu 30° .....	28
Tabel 14 Data Pengujian pada Sudut <i>Pitch</i> Sudu 30° .....	29
Tabel 15 Data Pengujian pada Sudut <i>Pitch</i> Sudu 30° .....	29
Tabel 16 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut <i>Pitch</i> Sudu 20° ....	30
Tabel 17 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut <i>Pitch</i> Sudu 20° ....	30
Tabel 18 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut <i>Pitch</i> Sudu 20° ....	30
Tabel 19 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut <i>Pitch</i> Sudu 25° ....	31
Tabel 20 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut <i>Pitch</i> Sudu 25° ....	31
Tabel 21 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut <i>Pitch</i> Sudu 25° ....	31
Tabel 22 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut <i>Pitch</i> Sudu 30° ....	32
Tabel 23 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut <i>Pitch</i> Sudu 30° ....	32
Tabel 24 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut <i>Pitch</i> Sudu 30° ....	32

## ABSTRAK

Angin merupakan sumber energi terbarukan berpotensi besar sebagai sumber energi pembangkit listrik. Saat ini, terdapat dua jenis turbin angin yang digunakan secara umum, yaitu turbin angin poros horizontal dan vertikal. Kedua jenis turbin tersebut didesain untuk menyerap energi angin di lahan terbuka yang bergerak secara horizontal. Di daerah perkotaan, angin mengalami perubahan arah karena dibelokkan oleh gedung-gedung tinggi. Oleh karena itu, dikembangkan model turbin angin poros silang yang didesain mampu menyerap energi angin yang datang dari dua sumber yaitu arah vertikal dan arah horizontal. Model turbin ini memiliki 10 sudu horizontal dan 5 sudu vertikal. Sebelumnya, pengujian performansi model turbin angin ini menggunakan dinamometer generator kapasitas 60 W, namun daya keluaran dari turbin angin tidak mencapai torsi besar dan putaran tinggi yang dibutuhkan. Dalam penelitian ini, menggunakan generator kapasitas 40 W guna menyelesaikan permasalahan sebelumnya. Parameter yang diukur dalam pengujian ini meliputi kecepatan angin, kecepatan putar turbin angin, tegangan listrik, dan arus listrik. Pengujian dilakukan dengan kecepatan angin 5,3 m/s, 5,8 m/s, 6,3 m/s, dan 6,8 m/s dengan sudut *pitch* sudu yang divariasikan menjadi 20°, 25°, dan 30°. Hasil pengujian dan analisis menunjukkan bahwa koefisien performansi maksimum turbin angin ini adalah sebesar 7,54%, tercapai pada kecepatan angin 6,3 m/s dengan sudut *pitch* sudu 25° dan *tip speed ratio* sebesar 1,08. Semakin besar kecepatan angin, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai kecepatan putar konstan menjadi semakin singkat. Pada kecepatan angin 6,3 m/s dengan sudut *pitch* sudu 25°, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kecepatan putar konstan sekitar 30 detik.

**Kata Kunci:** Kecepatan angin, Sudut *pitch* sudu, Koefisien performansi.

## **ABSTRACT**

*Wind is a renewable energy source with great potential as a source of energy for generating electricity. Currently, there are two types of wind turbines in general use, namely horizontal and vertical axis wind turbines. Both types of turbines are designed to absorb wind energy in open areas that move horizontally. In urban areas, the wind changes direction because it is deflected by tall buildings. Therefore, a cross-axis wind turbine model was developed which is designed to be able to absorb wind energy coming from two sources, namely the vertical direction and the horizontal direction. This turbine model has 10 horizontal blades and 5 vertical blades. Previously, performance testing of this wind turbine model used a generator dynamometer with a capacity of 60 W, but the output power of the wind turbine did not reach the large torque and high rotation required. In this research, a 40 W capacity generator was used to solve the previous problem. The parameters measured in this test include wind speed, wind turbine rotational speed, electric voltage and electric current. Tests were carried out with wind speeds of 5.3 m/s, 5.8 m/s, 6.3 m/s, and 6.8 m/s with blade pitch angles varied to 20°, 25°, and 30°. The test and analysis results show that the maximum performance coefficient of this wind turbine is 7.54%, achieved at a wind speed of 6.3 m/s with a blade pitch angle of 25° and a tip speed ratio of 1.08. The greater the wind speed, the shorter the time required to reach a constant rotational speed. At a wind speed of 6.3 m/s with a blade pitch angle of 25°, the time required to reach a constant rotational speed is around 30 seconds.*

**Keywords:** *Wind speed, Blade pitch angle, Performance coefficient.*

# **BAB I PENDAHULUAN**

## **1. Latar Belakang**

Mayoritas kebutuhan energi dunia dipenuhi oleh bahan bakar fosil, namun permintaan energi terus meningkat. Karena sumber energi fosil tidak terbarukan, pada akhirnya akan habis jika terus bertahan dengan sumber energi ini. Penggunaan energi listrik yang dihasilkan dari bahan bakar fosil berdampak pada naiknya kadar karbon dioksida yang dapat membahayakan lingkungan [1]. Menemukan sumber energi baru terbarukan yang juga bermanfaat secara ekologis adalah jawaban untuk masalah ini. Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi untuk dimanfaatkan, khususnya turbin angin. Dua jenis turbin angin yang saat ini digunakan adalah turbin angin poros horizontal dan vertikal, arah angin di daerah perkotaan mengalir dengan dua sumber yaitu vertikal dan horizontal, hal tersebut terjadi karena angin dibelokkan oleh gedung-gedung tinggi. Oleh karena itu dibuatlah model turbin angin tipe poros silang untuk menangkap energi angin yang mengalir dari arah vertikal dan horizontal [2].

Pada penelitian sebelumnya memiliki suatu masalah tentang validitas dinamometer generator DC yang masih diragukan karena tidak bekerja sesuai dengan teori dan hasil pengembangan orang lain. Dinamometer generator DC tidak mampu membangkitkan listrik ketika kecepatan putar di bawah 1000 rpm. Sehingga data performansi turbin angin yang didapat menyimpang jauh dari teori performansi turbin angin dan hasil beberapa kajian. Dalam pengembangan model turbin angin tipe poros silang data performansi merupakan hal yang sangat penting sebelum dikembangkan ke tahap pembuatan prototipe.

Berdasarkan permasalahan di atas maka melalui kegiatan penelitian ini akan diupayakan pengembangan dinamometer generator DC yang ada di laboratorium. Langkah pertama yaitu pengembangan dinamometer generator ini meliputi penggantian dinamometer generator DC daya kecil, pembebanan listrik lebih kecil, serta mengganti sistem transmisi menggunakan rantai dan roda gigi sproket. Langkah lainnya yaitu melakukan pengujian dan analisis performansi model turbin tipe poros silang. Diharapkan upaya tersebut dapat meningkatkan performansi turbin angin ketika dalam pengujian. Pengujian dilakukan secara skala laboratorium dengan kecepatan angin dan sudut *pitch* sudu horizontal yang bervariasi. Karakteristik performansi akan dihasilkan dari data pengujian, dan diharapkan mendekati keadaan sesungguhnya.

## **2. Rumusan Masalah**

Dalam rangka menanggulangi permasalahan yang telah diidentifikasi sebelumnya, rumusan masalah penelitian ini yaitu bagaimana mengembangkan dinamometer generator DC yang mampu membangkitkan listrik pada putaran rendah sehingga arus dan tegangan listrik yang dibangkitkan dapat diukur.

### **3. Tujuan**

Tujuan yang ingin tercapai pada penelitian ini yaitu mengembangkan dinamometer generator DC yang mampu membangkitkan listrik pada kecepatan putar kurang dari 1000 rpm untuk pengujian performansi model turbin angin tipe poros silang kapasitas 10 W.

### **4. Manfaat**

Penelitian ini diharapkan bermanfaat pada peningkatan pengetahuan masyarakat mengenai pengembangan dinamometer DC untuk pengujian model turbin angin tipe poros silang. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan informasi yang berharga dan dapat meningkatkan pemahaman tentang teknologi terbarukan dalam pemanfaatan energi angin. Selain itu, penelitian ini juga berpotensi memberikan kontribusi positif dalam pengembangan lebih lanjut pada bidang energi terbarukan dan teknologi turbin angin.

### **5. Batasan Masalah**

Pada pembahasan penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

- a. Pengembangan dinamometer generator DC yang meliputi penggantian dinamometer generator DC, pembebanan listrik, dan sistem transmisi.
- b. Pengujian dan analisis performansi model turbin angin kapasitas 10 W.

### **6. Sistematika Penulisan**

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini mencakup beberapa hal penting yang perlu diuraikan dalam penelitian, yaitu latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, prediksi hasil, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

#### **BAB II STUDI LITERATUR**

Bab ini membahas dasar teori yang berkaitan dengan sistem pembangkit listrik dengan turbin angin.

#### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini menjelaskan tentang diagram alir penelitian, penjelasan diagram alir penelitian, dan tempat penelitian.

#### **BAB IV PENGEMBANGAN DAN PENGUJIAN**

Bab ini berisi penjelasan tentang pengembangan dinamometer, data hasil pengujian, dan analisis performansi model turbin angin kapasitas 10 W.

#### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini menjelaskan seluruh rangkuman penelitian yang disimpulkan dan saran yang membangun untuk penelitian selanjutnya.

## **DAFTAR PUSTAKA**

Berisikan kutipan studi literatur yang berkaitan dengan penelitian skripsi tentang turbin angin sebagai pembangkit listrik.

## **LAMPIRAN**

Berisikan lampiran berupa data dan dokumentasi hasil penelitian.

## BAB II STUDI LITERATUR

### 1. Turbin Angin

Turbin angin merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik putaran poros [3]. Penggunaan turbin angin pada awal perkembangannya yaitu untuk memompa air, dan menumbuk biji hasil pertanian yang dikenal sebagai *windmill*. Pada saat ini penggunaan turbin angin yaitu sebagai pembangkit listrik. Sudu turbin angin akan mengalami tegangan geser pada permukaannya ketika bersentuhan dengan angin, sesuai dengan prinsip pengoperasian turbin angin [4]. Adanya gaya tekan (*drag*) yang sejajar dengan arah aliran fluida dan adanya gaya angkat (*lift*) yang tegak lurus terhadap arah aliran fluida menyebabkan terjadinya distribusi tegangan geser pada permukaan sudu [5]. Kedua gaya ini mengakibatkan adanya gerak rotasi pada sudu yang menyebabkan sudu dapat berputar. Pada dasarnya turbin angin sebagai pembangkit listrik tergolong menjadi 2 (dua) jenis yaitu turbin angin sumbu horizontal (TASH) dan turbin angin sumbu vertikal (TASV) [6].

### 2. Klasifikasi Turbin Angin

#### a. Turbin angin sumbu horizontal (TASH)

Turbin angin sumbu horizontal (TASH) adalah turbin angin yang poros utamanya berputar sesuai dengan arah angin. Putaran rotor dapat dikatakan baik apabila arah angin sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap putaran rotor [7]. Biasanya, turbin jenis ini memiliki bilah berbentuk *airfoil* yang menyerupai sayap pesawat terbang. Turbin berputar semakin cepat jika semakin banyak bilah yang dimilikinya [8].



Gambar 1 Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) [9]

#### 1) Kelebihan turbin angin sumbu horizontal

- Menara yang tinggi dapat memaksimalkan kecepatan angin sehingga menghasilkan daya yang besar.



- Memiliki efisiensi yang lebih tinggi dari TASV.
- *Cut-in wind speed* rendah.

## 2) Kekurangan turbin angin sumbu horizontal

- Membutuhkan sistem kendali *yaw* bantu untuk memutar turbin searah dengan angin karena rotor hanya dapat mengumpulkan angin dari satu arah [10].
- Mengapa Memindahkan menara tinggi dan bilah yang panjangnya hingga 90 m merupakan tantangan. Biaya transportasi diperkirakan mencapai 20% dari total biaya peralatan turbin angin [11].
- Turbin angin sumbu horizontal yang tinggi mahal, sulit dipasang, dan memerlukan operator terlatih selain membutuhkan *crane* yang sangat tinggi [12].
- Untuk mendukung *gearbox*, generator, dan sudu-sudu yang berat, diperlukan pembangunan menara yang besar.
- Radar di bandara mungkin terpengaruh oleh turbin angin sumbu horizontal yang tinggi.
- Perangkat kontrol *yaw* diperlukan untuk turbin angin sumbu horizontal [13].
- Tingkat kebisingan TASH > TASV.

### b. Turbin angin sumbu vertikal (TASV)

Turbin angin sumbu vertikal adalah turbin yang gerak poros dan rotornya sejajar dengan arah angin, sehingga rotor dapat berputar ke segala arah angin [14]. Karena dapat menghasilkan listrik pada kecepatan angin rendah, TASV merupakan pilihan terbaik untuk digunakan di lokasi dengan kecepatan angin rendah dan turbulensi lebih tinggi, seperti wilayah perkotaan [15]. Sistem untuk TASV, termasuk *gearbox* dan peralatan lainnya, dapat diposisikan lebih dekat ke tanah, sehingga memerlukan lebih sedikit perawatan dan peningkatan kontrol [16]. Turbin angin sumbu vertikal dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2 Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) [17]**

1) Kelebihan turbin angin sumbu vertikal

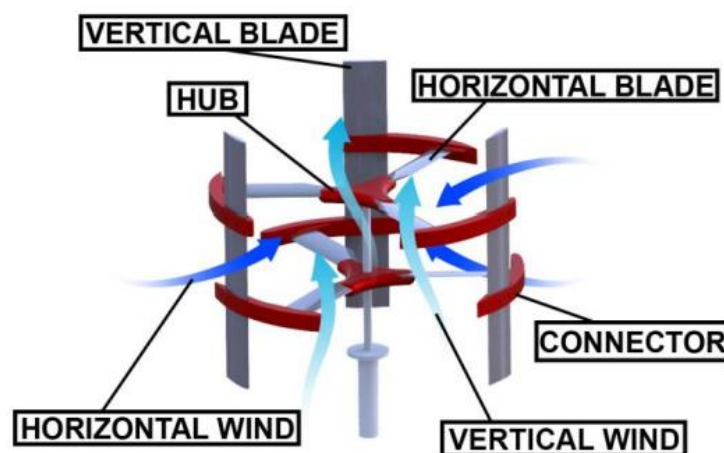
- Generator dapat diposisikan dekat bagian bawah turbin untuk memudahkan perawatan dan mencegah pengoperasian turbin mengubah arah angin [18].
- TASV sering kali memiliki rasio kecepatan ujung yang lebih rendah (perbandingan antara kecepatan putaran ujung bilah pisau dan kecepatan angin sebenarnya), sehingga membuatnya lebih rentan terhadap kerusakan akibat angin yang sangat kencang [19].
- TASV lebih kecil, lebih ringan dan lebih aman, serta tidak memerlukan mekanisme *yaw* [20].
- Tingkat kebisingan TASV < TASH.

2) Kekurangan turbin angin sumbu vertikal

- Generator dapat diposisikan dekat bagian bawah turbin untuk memudahkan perawatan dan mencegah pengoperasian turbin mengubah arah angin [18].
- TASV sering kali memiliki rasio kecepatan ujung yang lebih rendah (perbandingan antara kecepatan putaran ujung bilah pisau dan kecepatan angin sebenarnya), sehingga membuatnya lebih rentan terhadap kerusakan akibat angin yang sangat kencang [19].

c. Turbin angin sumbu silang (TASS)

Turbin angin sumbu silang merupakan jenis turbin angin yang dapat menyerap energi kinetik angin dari aliran udara yang berasal dari arah horizontal maupun arah vertikal.



Gambar 3 Turbin Angin Sumbu Silang (TASS) [2]

### 3. Persamaan Pada Turbin Angin

Persamaan yang ada pada turbin angin dapat dilihat pada paragraf di bawah ini:

a. Daya angin

Daya angin yang masuk ke turbin sama dengan laju energi kinetik angin turbin dan dinyatakan dengan persamaan di bawah ini:

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (1)$$

Keterangan:

$P$	=	Daya angin (W)
$\rho$	=	Massa jenis fluida (kg/m <sup>3</sup> )
$A$	=	Luas permukaan (m <sup>2</sup> )
$V$	=	Kecepatan angin (m/s)

b. Perbandingan kecepatan putar poros

Perbandingan kecepatan putar poros generator dengan poros turbin angin dapat dinyatakan dengan persamaan di bawah ini:

$$GR = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (2)$$

Rumus di atas merupakan perbandingan antara jumlah gigi pada sistem transmisi turbin angin.

$$n_1 = \frac{n_2}{GR} \quad (3)$$

Keterangan:

$GR$	=	Gear ratio
$n_1$	=	Kecepatan putar poros turbin angin (rpm)
$n_2$	=	Kecepatan putar poros generator (rpm)
$Z_1$	=	Jumlah gigi 1
$Z_2$	=	Jumlah gigi 2

c. Koefisien performansi

Koefisien performansi turbin angin adalah rasio daya rotor terhadap tenaga angin, yang dinyatakan oleh persamaan di bawah ini:

$$C_p = \frac{P_e}{P} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan:

$C_p$	=	Koefisien performansi
-------	---	-----------------------

$P_e$  = Daya elektrik (W)

$P$  = Daya angin (W)

d. Kecepatan tangensial turbin angin

Kecepatan tangensial rotor merupakan kecepatan gerak melingkar turbin angin yang menyinggung lintasan putarnya [23]. Kecepatan tangensial turbin angin dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (5)$$

Keterangan:

$\omega$  = Kecepatan tangensial turbin angin (rps)

$n$  = Kecepatan putar poros turbin angin (rpm)

e. *Tip speed ratio* (TSR)

*Tip speed ratio* (TSR) merupakan rasio antara kecepatan tangensial ujung sudu dan kecepatan angin aktual [24]. TSR dinyatakan oleh persamaan di bawah ini:

$$TSR = \frac{\omega r}{V} \quad (6)$$

Keterangan:

$TSR$  = *Tip speed ratio*

$\omega$  = Kecepatan tangensial rotor (rps)

$r$  = Jari-jari sudu (m)

$V$  = Kecepatan angin (m/s)

f. Daya turbin

Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk menentukan daya keluaran turbin angin:

$$P_e = V \cdot I \quad (7)$$

Keterangan:

$P_e$  = Daya listrik (W)

$V$  = Tegangan listrik (V)

$I$  = Arus listrik (A)

g. Soliditas sudu

Soliditas *chord*  $\sigma$  didefinisikan sebagai rasio total luas bidang terhadap total luas sapuan turbin angin. Perhitungan soliditas sudu dapat dinyatakan dengan persamaan:

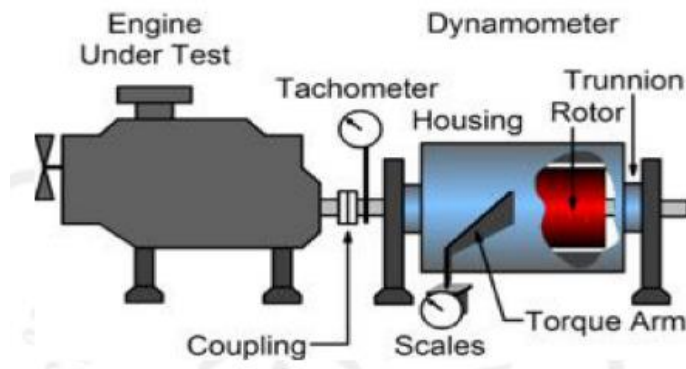
$$\sigma = \frac{Nc}{2\pi r} \quad (8)$$

Keterangan:

$\sigma$	=	Soliditas sudu
$N$	=	Jumlah sudu
$c$	=	Panjang <i>chord</i> sudu (m)
$r$	=	Jari-jari turbin angin (m)

#### 4. Dinamometer

Torsi dan tenaga yang dihasilkan oleh mesin motor atau penggerak putaran lainnya diukur dengan menggunakan dinamometer. Dinamometer dapat digunakan untuk menguji berbagai tugas pengembangan mesin, termasuk pengembangan sistem pembakaran dan kalibrasi kontrol manajemen mesin [25].



Gambar 4 Skema Dinamometer [25]

Gambar di atas menunjukkan skema dinamo meter. Komponen dari dinamo meter antara lain:

- Mesin yang diuji, atau mesin yang fungsinya akan diperiksa.
- Kopling yang menghubungkan poros dinamo meter dengan mesin.
- Kecepatan putaran mesin diukur menggunakan tachometer.
- Rotor, suatu elemen berputar yang dipasang pada mesin uji yang akan menyerap tenaga mesin.
- *Housing*, komponen badan dinamo meter yang bergerak pada saat rotor berputar. Perumahan perlu ditata agar dapat bergerak bebas.
- Lengan torsi, khususnya lengan torsi yang terhubung ke *housing*.

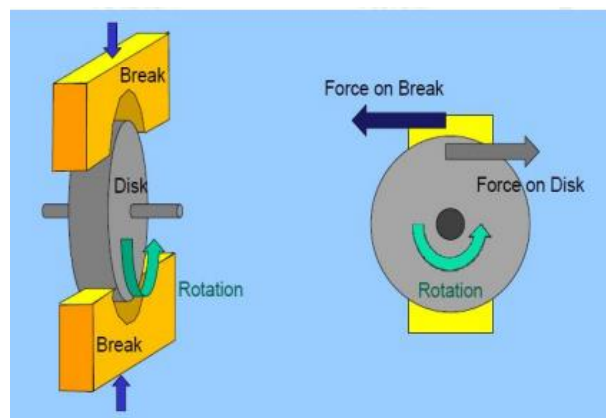
- Timbangan, khususnya timbangan yang menampilkan skala pembebanan yang diperlukan untuk menghitung torsi.
- *Trunnion*, wadah bantalan yang memungkinkan pergerakan tanpa batas.

## 5. Jenis-Jenis Dinamometer

Berikut beberapa jenis Dinamometer:

### a. *Frictional (Prony Break) Dynamometer*

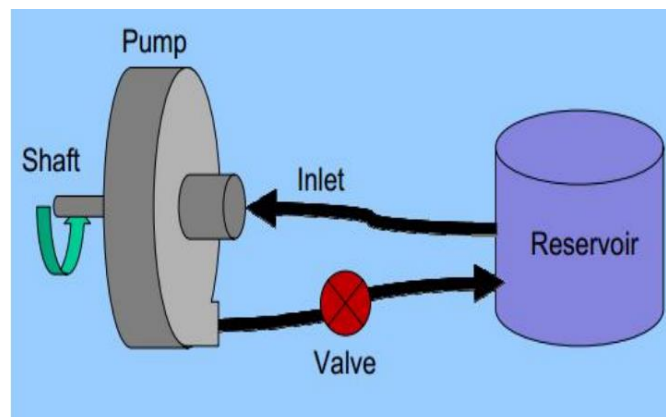
Cakram diputar oleh poros, dan saat berputar, rem memberikan tekanan pada lapisan luar cakram untuk memperlambatnya [26]. Gaya pada pengereman sama pengukuran dan berlawanan dengan gaya pada piringan.



Gambar 5 *Frictional (Prony Break) Dynamometer* [25]

### b. *Hydraulic Dynamometer*

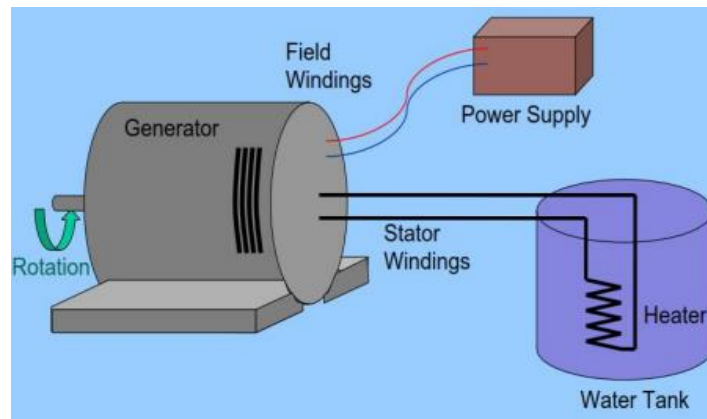
Poros menggerakkan impeler pompa, dan fluida kerja memasuki katup *throttle* melalui saluran hidrolik. Perputaran impeler menghasilkan *drag* hidrolik. Untuk mengubah beban mekanis, katup *throttle* harus dimodifikasi. Kepadatan daya dinamometer tipe hidrolik biasanya tinggi [27].



Gambar 6 *Hydraulic Dynamometer* [25]

c. *Generator type Dynamometer*

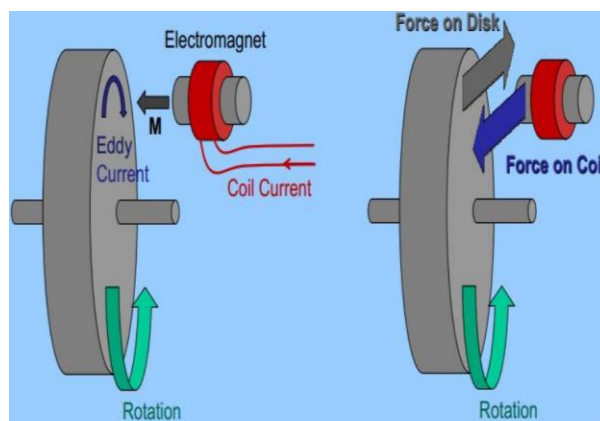
Rotor generator diputar oleh poros, dan beban listrik mengkonsumsi keluaran generator. Gerakan rotasi rotor ditentang oleh gaya elektromagnetik [28]. Biasanya, udara panas berfungsi sebagai beban keluaran untuk dynamometer. Beban mekanis biasanya divariasikan dengan mengendalikan rotor [29].



Gambar 7 *Generator type Dynamometer*[25]

d. *Eddy Current Dynamometer*

Poros memutar piringan yang berada di housing yang terdapat kumparan elektro-magnet yang besar. Medan magnet terjadi ketika arus melewati piringan, menghasilkan torsi diantara housing dan piringan [30]. *Eddy current dynamometer* dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 *Eddy Current Dynamometer*[25]

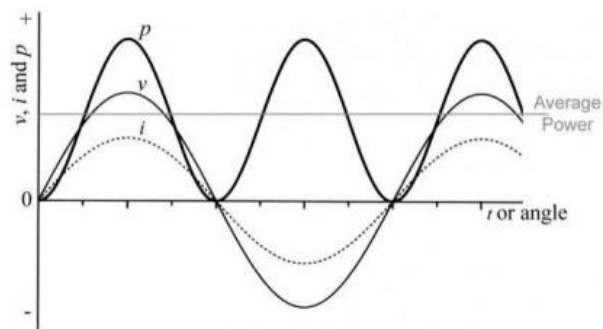
## 6. Beban Listrik

Beban listrik merupakan beban yang ditanggung oleh semua alat yang membutuhkan energi listrik. Beban listrik mempunyai hubungan dengan tegangan dan arus listrik seperti yang disebutkan pada hukum OHM. Di mana arus berbanding lurus dengan tegangan dan berbanding

terbalik dengan hambatan, yang mengakibatkan hambatan dapat menghalangi aliran arus [31].  
Beban listrik dapat dibagi menjadi 3 (tiga) yaitu:

a. Beban Resistif (R)

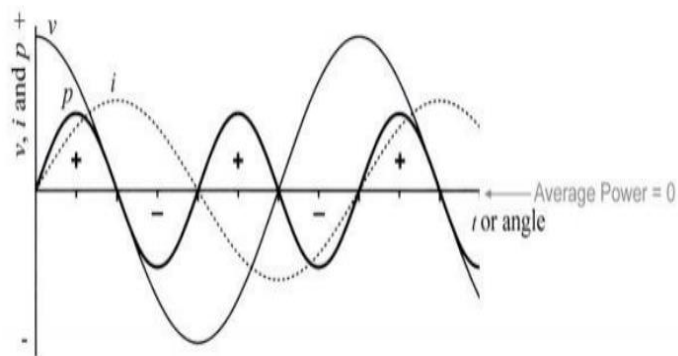
Beban yang hanya mencakup komponen hambatan disebut beban resistif. Menurut konsep resistor, beban resistif menyebabkan panas dihasilkan ketika arus listrik melewatinya. Beban semacam ini mempunyai faktor daya sebesar 1 (satu), hanya menggunakan beban aktif saja. Elemen pemanas dan lampu merupakan dua contoh peralatan listrik yang termasuk dalam kategori beban resistif.



Gambar 9 Gelombang Listrik Beban Resistif [31]

b. Beban Induktif (L)

Beban induktif, yang meliputi kumparan, transformator, dan solenoida, tersusun dari kumparan kawat yang dililitkan pada inti. Arus digeser fasanya oleh beban induktif, sehingga menghasilkan karakteristik tertinggal tegangan sebesar  $90^\circ$ . Energi medan magnet yang tersimpan menyebabkan perubahan fasa arus tertinggal dari tegangan. Daya reaktif dan aktif diserap oleh beban semacam ini. Motor listrik, kipas angin, peralatan las listrik, dan perangkat lainnya merupakan contoh beban induktif.

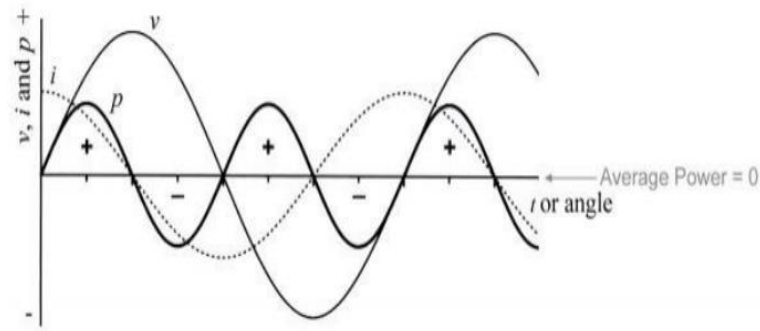


Gambar 10 Gelombang Listrik Beban Induktif [31]

c. Beban Kapasitif (C)



Beban yang disebut beban kapasitif mempunyai kapasitas untuk menyimpan energi listrik yang berasal dari suatu rangkaian listrik. Oleh karena itu, arus mendahului tegangan. Beban semacam ini memancarkan daya reaktif sekaligus menyerap daya aktif. Kapasitor adalah perangkat listrik yang memiliki beban kapasitif.



Gambar 11 Gelombang Listrik Beban Kapasitif [31]

## 7. Mikrokontroler

IC, memori, pengatur waktu, saluran komunikasi serial paralel, *port input/output*, dan ADC adalah komponen mikrokontroler, komputer kecil. Mikrokontroler digunakan untuk pemrograman dan melakukan tugas [32]. Aplikasi mikrokontroler antara lain pengendalian, otomasi industri, pengumpulan data, telekomunikasi, dan masih banyak lagi. Penggunaan mikrokontroler memiliki keuntungan karena tidak mahal, dapat diulang, dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna. Arduino UNO merupakan salah satu mikrokontroler yang dimanfaatkan. *Board* UNO R3 sangat cocok digunakan pada penelitian ini, karena mudah ditemukan. Contoh *board* arduino UNO dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12 Board Arduino UNO R3 [32]

Mikrokontroler ATmega328P, yang beroperasi pada 5 V dan memiliki 14 pin digital dan 6 pin analog, adalah *chip* yang ideal untuk proyek ini. Spesifikasi arduino UNO R3 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi Arduino UNO R3

Komponen	Spesifikasi
<i>Microcontroller</i>	Atmega328
<i>Operating Voltage</i>	5V
<i>Input Voltage (recommended)</i>	7-12V
<i>Input Voltage (limits)</i>	6-20V
<i>Digital I/O Pin</i>	14 (of wich 6 provide PWM output)
<i>Analog Input Pin</i>	6
<i>DC current per I/O Pin</i>	40 mA
<i>DC Current for 3.3V Pin</i>	50 mA
<i>Flash Memory</i>	32 KB (Atmega328) of wich 0.5 KB usbootloader
<i>SRAM</i>	2 KB (Atmega328)
<i>EEPROM</i>	1 KB (Atmega328)
<i>Clock Speed</i>	16 MHz
<i>Length</i>	68.6 mm
<i>Width</i>	53.4 mm
<i>Weight</i>	25 gr

## 8. Riview Jurnal

*Tabel 2 Preliminary Test on Cross Axis Wind Turbine*

Judul	Preliminary Test on Cross Axis Wind Turbine
Nama Jurnal	Advanced Science Letters
Volume dan Halaman	Vol. 24, 9620–9622
Tahun	2018
Penulis	Endang Achdi, Berkah Fajar, S.H. Winoto, dan Ibnu Lufti
Riview	Yudi Setiadi
Tanggal Riview	4 Oktober 2022
Latar Belakang	<p>Upaya pemanfaatan energi angin untuk pembangkit listrik merupakan bagian dari pengembangan penggunaan sumber energi terbarukan. Salah satu tujuan pengembangan energi terbarukan adalah peningkatan kinerja pembangkit listrik yang bersumber dari energi terbarukan. Pada awal pengembangannya tenaga turbin angin ini digunakan secara langsung, seperti untuk memompa air dan menumbuk biji-bijian hasil pertanian. Sedangkan perkembangan terkini hingga saat ini, pemanfaatan turbin angin adalah untuk pembangkit listrik. Turbin angin untuk pembangkit listrik dapat dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal. Secara umum, turbin angin sumbu horizontal lebih efisien daripada turbin angin sumbu vertikal. Penggunaan turbin angin sumbu horizontal membutuhkan struktur pendukung yang besar dan rumit. Sedangkan penggunaan turbin angin sumbu vertikal membutuhkan dorongan awal untuk mulai berputar dengan sendirinya. Baik turbin angin sumbu horizontal maupun turbin angin sumbu vertikal dirancang untuk mengubah energi angin yang datang secara horizontal. Berdasarkan banyak penelitian, karakteristik angin pada gedung-gedung bertingkat di perkotaan dapat didekati sebagai aliran angin dalam arah horizontal dan vertikal.</p>
Tujuan Penelitian	Tujuan dari studi tahap awal ini adalah untuk mendapatkan gambaran tentang faktor-faktor yang mempengaruhi peningkatan efisiensi.
Permasalahan	Dari hasil pengujian terhadap model turbin angin ini menunjukkan bahwa efisiensi turbin angin ini masih rendah.
Metodologi Penelitian	Tahapan utama dalam perancangan model turbin angin ini adalah menentukan jumlah sudu, pemilihan sudu standar airfoil, geometri deflektor, dimensi rotor, dan perhitungan unjuk kerja. Tahapan ini mempertimbangkan hasil penelitian yang ada dengan beberapa perubahan. Rancangan model turbin angin yang ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini memiliki 15 bilah, bilah airfoil menggunakan standar NACA 0012 dan NACA 4412, bentuk deflektor melengkung, dan ukuran diameter rotor 70 cm dan tinggi 60 cm.
Hasil Penelitian	Hasil analisis dan evaluasi menunjukkan bahwa daya keluaran dan efisiensi turbin angin dipengaruhi oleh sudut pitch sudu. Pada kecepatan angin sekitar 7 m / s, daya maksimum diperkirakan 0,15 W dan efisiensi maksimum hanya 0,17% dengan sudut pitch sekitar 60 dan rasio kecepatan tip sekitar 0,35.

**Tabel 3 Design and Early Development of a Novel Cross Axis Wind Turbine**

Judul	Design and Early Development of a Novel Cross Axis Wind Turbine
Nama Jurnal	Konferensi Internasional tentang Energi Terapan
Volume dan Halaman	Volume 668 – 674
Tahun	2017
Penulis	Wan Khairul Muzammil, Kok Hoe Wong, Wen Tong Chong, Mohammed Gwani, Chin Joo Tan, Shin Chew Poh, dan Xo Hoe Wong.
Riview	Yudi Setiadi
Tanggal Riview	4 Oktober 2022
Latar Belakang	<p>Perkembangan turbin angin kecil untuk daerah perkotaan telah mendapat banyak perhatian karena meningkatnya kekhawatiran dalam masalah energi global. Energi angin diakui sebagai sumber potensial gratis, bersih dan tak habis-habisnya energi, terutama untuk penggunaan di kota-kota perkotaan di mana didorong untuk menempatkan turbin angin lebih dekat ke daerah penduduk karena berkurangnya jumlah lokasi ekonomi. Turbin angin adalah perangkat yang mengubah energi dari angin menjadi tenaga listrik yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi. Ada dua jenis turbin angin; turbin angin sumbu horizontal (HAWT) dan turbin angin sumbu vertikal (VAWT). HAWT telah terbukti sangat efektif dalam menghasilkan listrik dari angin. Namun kebutuhan akan mekanisme yaw, struktur menara yang besar mendukung nacelle yang berat dan tingkat kebisingan yang tinggi menghambat penggunaan HAWT di lingkungan perkotaan. Karena kelemahan dari HAWT, maka VAWT dianggap lebih cocok untuk digunakan di perkotaan. VAWT lebih disukai untuk ditempatkan di daerah perkotaan karena kurang memperhatikan ukurannya dan keuntungan menghasilkan energi yang dekat dengan konsumen (pembangkit energi di tempat). VAWT lebih ringan dan aman, serta tidak memerlukan mekanisme yaw untuk memutar VAWT menghadap arah angin, sehingga dapat dioperasikan dari angin yang datang dari segala arah horizontal. Meskipun keunggulan umum VAWT dibandingkan dengan HAWT, VAWT juga memiliki kelemahan seperti efisiensi yang relatif lebih rendah dari rotor Savonius dan kemampuan self-starting yang buruk dari rotor Darrieus. Karena berbagai kelemahan VAWT dan HAWT ini, oleh karena itu tujuan utama dari konsep baru untuk mengatasi kelemahan VAWT dan HAWT dengan mengusulkan jenis turbin angin baru yang disebut turbin angin sumbu silang (CAWT).</p>
Tujuan Penelitian	Tujuan utama dari konsep baru untuk mengatasi kelemahan VAWT dan HAWT dengan mengusulkan jenis turbin angin baru yang disebut turbin angin sumbu silang (cross axis wind turbine (CAWT)).
Permasalahan	HAWT, VAWT juga memiliki kelemahan seperti efisiensi yang relatif lebih rendah dari rotor Savonius dan kemampuan self-starting yang buruk dari rotor Darrieus.
Metodologi Penelitian	Untuk menguji kinerja CAWT, percobaan dilakukan untuk mensimulasikan aliran udara yang datang di lingkungan dunia nyata di mana aliran angin tidak seragam dan bergejolak. Sederet sembilan kipas ventilasi diatur dalam konfigurasi 3 x 3. Pengukuran kecepatan angin dilakukan di bagian hilir susunan kipas, di tengah bagian uji. Pengukuran kecepatan angin dilakukan pada grid 3 x 3 dengan titik-titik dengan jarak yang sama yang mencakup penampang 1,0 m x 1,0 m. Pada 3,5 m hilir dari susunan kipas, kecepatan angin adalah $4,5 \pm 0,2$ m/s.
Hasil Penelitian	Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa CAWT menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam output daya dan kinerja kecepatan rotasi dibandingkan dengan turbin angin sumbu vertikal (VAWT) berbilah lurus konvensional, di mana CAWT $C_{Pmax}$ 2,5 kali lebih tinggi dari $C_{Pmax}$ yang dihasilkan oleh VAWT untuk kecepatan angin yang sama 4,5 m/s.

**Tabel 4** *Design and Testing of a Novel Building Integrated Cross Axis Wind Turbine*

Judul	Design and Testing of a Novel Building Integrated Cross Axis Wind Turbine
Nama Jurnal	Applied Sciences
Volume dan Halaman	Volume No 1-22
Tahun	2017
Penulis	Wen Tong Chong, Mohammed Gwani, Chin Joo Tan, Wan Khairul Muzammil, Sin Chew Poh, dan Xo Hoe Wong
Riview	Yudi Setiadi
Tanggal Riview	4 Oktober 2022
Latar Belakang	<p>Pemasangan turbin angin di lingkungan binaan diperkirakan memiliki potensi besar tidak hanya untuk memenuhi kebutuhan energi lingkungan perkotaan tetapi juga untuk membantu mengatasi kemiskinan bahan bakar dan mencapai pengurangan emisi. Selama beberapa dekade terakhir, kemajuan signifikan yang dibuat dalam konversi energi angin menjadi tenaga listrik adalah hasil dari penelitian teknik yang cukup besar dan pengembangan mesin angin dengan penekanan pada peningkatan desain, aerodinamika, struktur dan karakteristik sistem. Penelitian telah menunjukkan bahwa pemasangan turbin angin pada bangunan perkotaan dipengaruhi oleh posisi (ketinggian di atas bubungan atap) dan posisi relatif terhadap arah angin yang berlaku. Pengaruh bangunan di turbin angin dibedakan antara konversi energi angin di pedesaan dan perkotaan. Namun, sumber daya angin di lingkungan perkotaan rumit di mana sumber daya sebanding dengan topografi permukaan, pengaruh suhu dan sifat dinamis dari lingkungan perkotaan. Karena panjang kekasaran lingkungan yang tinggi dan adanya hambatan yang dicirikan oleh perbedaan bentuk dan porositas di sepanjang jalur aliran aliran, profil angin di daerah perkotaan sepenuhnya tidak sama dengan profil berbasis log-law klasik dengan nol- elevasi kecepatan bergeser ke nilai khusus (perpindahan, <math>d</math>) yang merupakan fungsi dari ketinggian rata-rata bangunan tetangga. Kecepatan angin meningkat secara logaritmik dengan ketinggian. Profil angin alami mengekstrapolasi ke kecepatan angin nol pada ketinggian perpindahan nol (<math>d</math>) ketika di atas vegetasi atau bangunan.</p>
Tujuan Penelitian	Menyajikan desain baru turbin angin sumbu silang terpadu (CAWT) bangunan yang dapat beroperasi di bawah arah angin ganda, yaitu angin horizontal dan angin vertikal dari bagian bawah turbin.
Permasalahan	Prospek pemanfaatan energi angin di daerah perkotaan tidak menjanjikan karena kecepatan angin yang rendah dan turbulensi yang disebabkan oleh hambatan di sekitarnya.
Metodologi Penelitian	Prototipe dibangun dan diintegrasikan pada model bangunan mock-up dengan atap berbentuk pelana dengan dimensi (panjang, lebar, dan tinggi) 1450 mm × 740 mm × 1364 mm. Kelayakan pengintegrasian CAWT ke bangunan dengan atap berbentuk gable diselidiki melalui studi eksperimental menggunakan mock-up rooftop. Kinerja CAWT dibandingkan dengan kinerja VAWT berbilah lurus konvensional yang memiliki dimensi yang sama di bawah kondisi eksperimen yang sama.
Hasil Penelitian	Hasil yang diperoleh dari studi eksperimental menunjukkan bahwa ada peningkatan yang signifikan dalam koefisien daya ( $C_p$ ) dan perilaku self-starting bangunan terpadu CAWT dibandingkan dengan VAWT berbilah lurus. Pada 100 mm tinggi, $C_{p,max}$ nilai CAWT meningkat sebesar 266%, yaitu, 0,0345-0,1263, pada rasio ujung kecepatan (TSR)( $\lambda$ ) dari 1,1 dan pada kecepatan angin 4,5 m / s. Perbaikan serupa dalam kinerja juga diamati untuk semua kondisi ketinggian CAWT di atas atap di mana CAWT mengungguli VAWT straight-bladed sebesar 196%, 136% dan 71% pada TSR 1,16, 1,08, dan 1,12 untuk $Y = 150, 200,$ dan 250 mm, masing-masing. Selain itu, performa CAWT lebih baik pada sudut pitch 10° dari blade horizontal dibandingkan dengan sudut pitch lainnya.

**Tabel 5 Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Savonius type L**

Judul	Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Savonius
Nama Jurnal	INTEK Jurnal Penelitian
Volume dan Halaman	Volume 6 (1) :64-68
Tahun	2019
Penulis	Jamal
Riview	Yudi Setiadi
Tanggal Riview	8 Oktober 2022
Latar Belakang	Angin adalah udara yang bergerak dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah. Dengan mengubahnya menjadi bentuk energi lain, pergerakan angin ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber tenaga. Energi masukan turbin mengacu pada energi angin sebelum memasuki turbin angin. Besarnya energi angin yang dapat diubah menjadi energi mekanik bergantung pada efisiensi turbin. Energi mekanik, kadang-kadang disebut energi keluaran turbin, adalah energi yang dihasilkan turbin setelah menerima energi angin. Turbin angin Savonius dapat digunakan untuk mengubah energi angin menjadi energi mekanik.
Tujuan Penelitian	Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan efisiensi turbin angin Savonius dengan melakukan penyesuaian jumlah bilah turbin dan laju aliran udara.
Permasalahan	Telah dilakukan penelitian terhadap turbin angin Savonius dengan jumlah sudu yang berbeda-beda, terutama turbin Savonius dengan 3 sudu yang mempunyai efisiensi mekanik sebesar 76%. Penelitian lain mengamati turbin Savonius tipe L dengan 2, 3, dan 4 bilah turbin. Diketahui bahwa 3 bilah memiliki efisiensi tertinggi sedangkan 4 bilah memiliki efisiensi terendah.
Metodologi Penelitian	Pendekatan penelitiannya adalah eksperimental, dengan turbin angin Savonius dievaluasi dengan jumlah bilah turbin yang berbeda, termasuk 2, 3, dan 4. Variasi lainnya mencakup kecepatan angin yang berbeda, termasuk 3,5, 4,5, 5,5, dan 6,5 m/s.
Hasil Penelitian	Berdasarkan hasil penelitian, turbin 2 bilah menghasilkan putaran yang lebih besar namun momen torsinya lebih kecil dibandingkan turbin 3 dan 4 bilah. Hal ini ditunjukkan dengan buruknya efisiensi turbin 2 bilah pada kecepatan angin rendah dengan pembebanan berat. Turbin angin yang efisien mempunyai dua bilah dan beroperasi pada kecepatan 3,5 m/s. Pada kecepatan angin 3,5 m/s, efisiensi turbin 2 sudu cenderung sama dengan turbin 3 dan 4 sudu hingga beban 0,5 N, namun turun pada 0,6 hingga 1,2 N. Sebaliknya, pada pada kecepatan angin 4,5 hingga 6,5 m/s, efisiensi turbin 2 sudu lebih tinggi dibandingkan turbin 3 dan 4 sudu hingga 1,2 N, namun menurun seiring bertambahnya beban.

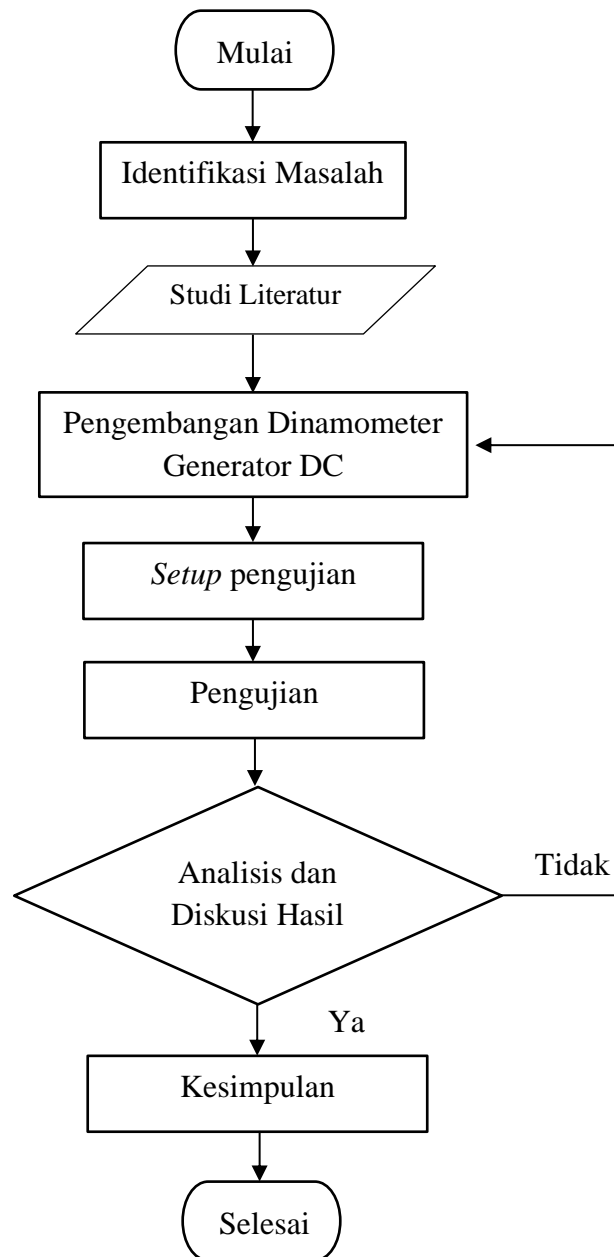
**Tabel 6 Pengaruh Sudut *Pitch* pada *Blade* Terhadap Kinerja Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe *Darrieus-H NACA 3412***

Judul	Pengaruh Sudut Pitch pada Blade Terhadap Kinerja Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Darrieus-H Naca 3412
Nama Jurnal	JTM-Jurnal Teknik Mesin
Volume dan Halaman	Vol. 2 No. 2, Halaman: 72 - 76
Tahun	2019
Penulis	Fina Andika Frida Astuti
Riview	Yudi Setiadi
Tanggal Riview	8 Oktober 2022
Latar Belakang	Di Indonesia, penggunaan energi terbarukan masih relatif sedikit. Sumber energi terbarukan antara lain angin, panas bumi, biomassa, air, dan matahari. Energi angin bersifat adaptif karena dapat digunakan di darat, di pegunungan, dan di laut. Hanya 1,06 MW dari 28.658,36 MW kapasitas pembangkit listrik di Indonesia yang masih memanfaatkan energi angin. Kecepatan angin di Indonesia berkisar antara 2 m/s hingga 6 m/s, sehingga fasilitas pembangkit listrik tenaga angin berukuran kecil dan menengah (10-100 kW) layak untuk dibangun. Energi angin diubah menjadi energi mekanik dengan menggunakan turbin angin, dan energi mekanik ini selanjutnya dapat menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Turbin angin dapat dibedakan menjadi dua kategori, yaitu turbin sumbu vertikal dan turbin sumbu horizontal, berdasarkan orientasi sumbu putarnya. Tipe Darrieus, salah satunya Darrieus tipe H, merupakan salah satu jenis turbin angin sumbu vertikal. Turbin angin Darrieus tipe H merupakan salah satu jenis turbin sumbu vertikal yang menghubungkan poros rotor dengan sudu dan lengan.
Tujuan Penelitian	Dengan mengubah jumlah pitch sudu turbin dan kecepatan aliran udara, penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus-H Naca 3412.
Permasalahan	Banyak investigasi, seperti studi Darrieus tipe H, telah dilakukan. Dominy mengevaluasi kinerja turbin dengan 1, 2, dan 3 sudu untuk menentukan jumlah sudu yang optimal untuk turbin Darrieus tipe H. Berdasarkan hasil percobaan, sebaiknya digunakan 3 bilah pada kondisi angin rendah. Pada bilah NACA 0012, 0015, dan 0018, Hiren mempelajari dampak sudut pitch pada sudut (-80, -40, 00, 40, dan 80). Menurut penelitian, bilah Darrieus Type H dipengaruhi oleh sudut pitch. Pengaruh sudut pitch pada rentang 00, 200, 400, 600, 800, 1000, dan 1200 derajat serta jumlah bilah 3, 4, dan 5 juga ditunjukkan oleh Napitulu. Kinerja turbin akan meningkat dengan semakin besarnya sudut pitch, namun akan menurun seiring dengan meningkatnya sudut pitch..
Metodologi Penelitian	Pada tahap desain, seperti saat menentukan ukuran bagian turbin, merancang turbin angin, menguji kinerja turbin angin, dan menilai hasilnya. Pada langkah pengujian ini, sudut pitch sudu diubah sebesar -200, -100, 00, 100, dan 200 derajat. 3,0 m/s, 3,5 m/s, dan 3,9 m/s adalah kecepatan berbeda yang dapat dicapai dengan mengubah jumlah bilah. Pisau yang digunakan sebanyak 2 unit, 3 unit, dan 4 unit.
Hasil Penelitian	Besarnya daya listrik yang dihasilkan turbin angin bergantung pada sudut pitch pada semua kecepatan angin. Sudut pitch 00 menghasilkan daya listrik paling besar (4,7 W). Daya listrik yang dihasilkan pada sudut pitch maksimum (00) dan kecepatan angin (3,5 m/s) adalah 4,7 W. Pada semua kecepatan angin, daya terus menurun seiring dengan naiknya sudut pitch, baik untuk sudut pitch positif maupun negatif. Variasi sudut pitch mempengaruhi jumlah listrik yang dihasilkan pada seluruh komponen sudu. Daya listrik paling besar dihasilkan pada sudut pitch 0 yaitu 4,7 W untuk sudu 2 unit, 5 W untuk sudu 3 unit, dan 5 W untuk sudu 4 unit. Daya listrik akan berkurang seiring dengan naiknya sudut pitch. Daya listrik terendah atau 3 W dihasilkan dengan sudut pitch -200 dan jumlah sudu 2.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 1. Tahapan Penelitian

Dalam penelitian mengenai pengembangan dinamometer generator untuk pengujian performansi model turbin angin tipe poros silang kapasitas 10 W terdiri dari beberapa tahapan. Tahapan tersebut diperlihatkan pada Gambar 13 di bawah ini:



Gambar 13 Metodologi Penelitian



## 2. Penjelasan Tahapan Penelitian

### a. Identifikasi masalah

Identifikasi masalah dalam penelitian ini yaitu memilih permasalahan dinamometer generator hasil penelitian sebelumnya yang dijadikan penelitian.

### b. Studi literatur

Studi literatur dalam penelitian ini yakni *review* dinamometer generator hasil pengembangan sebelumnya dan teori yang berkaitan dengan pengembangan dinamometer generator.

### c. Pengembangan dinamometer generator

Pengembangan dinamometer generator meliputi penggantian dinamometer generator, beban listrik, dan sistem transmisi daya.

### d. *Setup* pengujian

*Setup* pengujian dalam penelitian ini yaitu mempersiapkan fasilitas yang akan digunakan pada pengujian.

### e. Pengujian

Pengujian dalam penelitian ini meliputi pengukuran besaran-besaran yang akan digunakan untuk menentukan performansi model turbin angin tipe poros silang.

### f. Pengolahan data

Pengolahan data dalam penelitian ini yaitu mengolah data hasil pengujian menjadi parameter performansi model turbin angin tipe poros silang.

### g. Analisis dan diskusi hasil

Analisis dan diskusi hasil dilakukan untuk memperoleh karakteristik performansi model turbin angin ini.

### h. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dalam penelitian ini yaitu tentang hasil pengembangan dinamometer generator dan karakteristik performansi model turbin angin tipe poros silang.

## 3. Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Mesin Fakultas Teknik Universitas 17 Agustus 1945 (UNTAG) Cirebon Jl. Perjuangan No.17, Karyamulya, Kec. Kesambi, Kota Cirebon, Jawa Barat 45131. Beberapa hal yang dilakukan saat berada di Laboratorium Mesin Fakultas Teknik Universitas 17 Agustus 1945 (UNTAG) yakni:

- Mempersiapkan alat untuk melakukan pengujian pada tanggal 16 Februari 2023 pukul 10.00 WIB sampai 11.00 WIB.
- Melakukan pengujian performansi model turbin angin pada tanggal 16 Februari 2023 pukul 11.30 WIB sampai 14.00 WIB.
- Pengujian berlangsung selama 2 hari yaitu pada tanggal 16 dan 17 Februari 2023.
- Merapihkan alat setelah pengujian pada tanggal 17 Februari 2023 pukul 15.00 WIB.

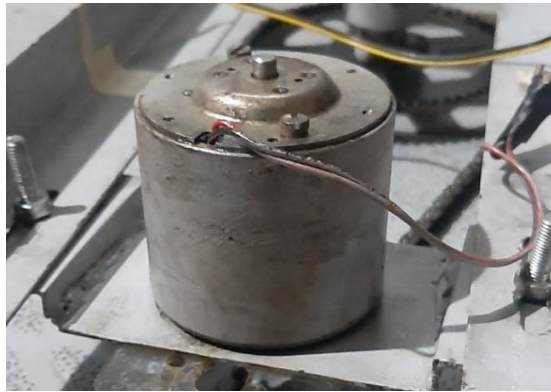
## BAB IV PENGEMBANGAN DAN PENGUJIAN

### 1. Pengembangan Dinamometer Generator DC

Pengembangan dinamometer generator DC ini yaitu meliputi:

a. Mengganti dinamometer generator DC

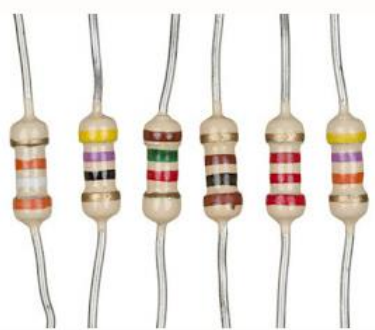
Dinamometer sebelumnya memiliki kapasitas generator 60 W pada putaran 20000 rpm sedangkan generator DC hasil pengembangan memiliki kapasitas daya 40 W pada putaran 13000 rpm. Dengan mengganti generator yang memiliki kapasitas daya lebih kecil diharapkan arus dan tegangan dapat dibangkitkan pada putaran yang rendah, di bawah 1000 rpm.



Gambar 14 Dinamometer Generator Kapasitas 40 W

b. Mengganti pembebanan

Pembebanan listrik menggunakan lampu bohlam 5 W sulit diatur nilai beban listriknya, sehingga dalam melakukan pengujian kesulitan menentukan pembulatan nilai beban listrik yang ditentukan.



Gambar 15 Resistor [32]

Pembebanan listrik menggunakan resistor diharapkan dapat mengatasi masalah sebelumnya, sehingga nilai pembebanan listrik dapat diatur sesuai dengan nilai beban listrik yang ditentukan.

c. Mengganti sistem transmisi

Sistem transmisi daya menggunakan sabuk dan puli memiliki kekurangan karena adanya rugi-rugi akibat terjadinya slip, disebabkan oleh temperatur yang meningkat ketika putaran cepat. Kecepatan sabuk direncanakan untuk 10 sampai 20 m/s pada umumnya, dan maksimum sampai 25 m/s. Daya maksimum yang dapat ditransmisikan kurang lebih sampai 500 kW.

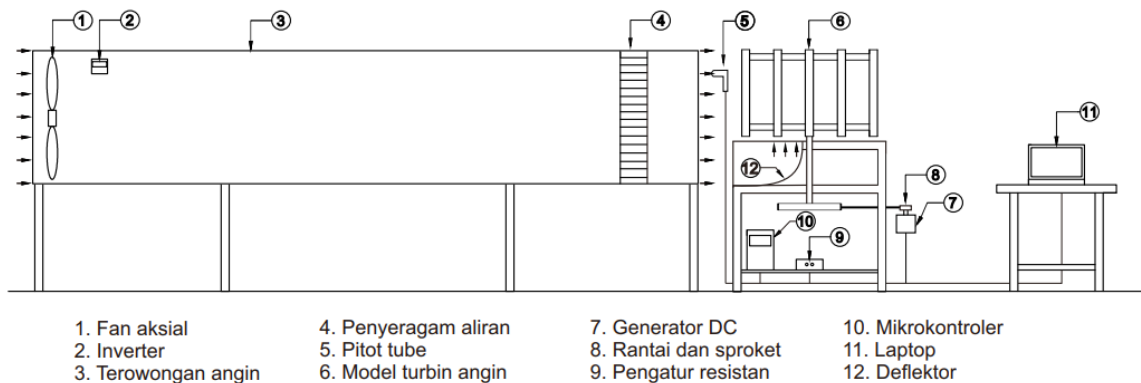


Gambar 16 Rantai dan Roda Gigi Sproket

Sistem transmisi daya menggunakan rantai dan roda gigi sproket dapat mengurangi terjadinya slip karena dapat bertahan sampai dengan kecepatan 35 m/s.

## 2. Setup Pengujian

Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan data-data yang akan digunakan untuk menentukan karakteristik performansi model turbin angin tipe poros silang, pada pengujian ini akan diperoleh evaluasi untuk perkembangan pada jenis turbin angin ini. *Setup* pengujian model turbin angin tipe poros silang ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 17 Setup Pengujian

Berikut penjelasan fungsi dari alat yang digunakan pada pengujian performansi turbin angin tipe poros silang:

- Kipas angin aksial berfungsi sebagai sumber energi angin. Blower memiliki kapasitas daya 1500 W
- *Inverter* frekuensi berfungsi sebagai alat yang mengatur kecepatan angin dari *blower*.
- Terowongan angin (*wind tunnel*) berfungsi mensimulasikan aliran udara terhadap turbin angin dengan kecepatan aliran konstan, seragam, dan tingkat turbulensi yang rendah.
- *Flow straightener* berfungsi untuk menyeragamkan aliran angin yang akan keluar dari terowongan angin.
- *Pitot tube* berfungsi untuk mengukur kecepatan aliran angin yang keluar dari terowongan angin yang akan mengenai turbin angin.
- Model turbin angin merupakan alat yang akan diuji untuk mengetahui performansinya.
- Generator DC berfungsi sebagai alat yang mengubah energi mekanik putaran poros menjadi energi listrik.
- Mikrokontroler berfungsi sebagai perangkat yang merekap tegangan listrik, arus listrik, kecepatan putar generator yang terukur lalu menampilkannya di papan *display*.
- Pengatur resistansi berfungsi sebagai pembebanan atau hambatan listrik.
- Transmisi daya dari turbin ke generator menggunakan rantai dan sproket dengan rasio 72:7.
- Laptop berfungsi untuk menampilkan data hasil pengujian yang terekam oleh arduino.
- Deflektor berfungsi untuk mengubah arah angin.

Persiapan sebelum melakukan pengujian model turbin angin tipe poros silang adalah sebagai berikut:

- Mempersiapkan alat ukur seperti dinamometer generator DC, tachometer, *pitot tube*, multimeter, dan busur derajat.
- Mengkalibrasi alat ukur yang akan digunakan sebelum pengujian.
- Menyiapkan model turbin angin tipe poros silang yang akan diuji.
- Menyiapkan *blower* sebagai sumber energi angin.

### 3. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian model turbin angin tipe poros silang yaitu meliputi:

- Pengujian performansi dilakukan pada kecepatan angin yang keluar dari terowongan angin diatur dengan menggunakan inverter, selanjutnya mengukur kecepatan angin menggunakan *pitot tube* mulai dari 5,3 m/s, 5,8 m/s, dan 6,3 m/s. Sudut *pitch* sudut horizontal diatur secara manual mulai dari 20°, 25°, dan 30°.

- Pengujian tanpa beban dilakukan pada setiap kecepatan angin konstan dan sudut *pitch* sudu yang divariasikan, diamati waktu yang dibutuhkan dari keadaan turbin diam sampai kecepatan putaran konstan
- Pengujian menggunakan beban dilakukan pada setiap kecepatan angin konstan dan sudut *pitch* sudu yang divariasikan, diamati tegangan listrik, arus listrik, dan kecepatan putar generator. Beban pada generator DC dinaikan secara bertingkat menggunakan potensiometer arduino.
- Setiap beban yang konstan tegangan listrik, dan arus listrik akan diukur manual dengan multimeter dan dinamometer generator, untuk kecepatan putar generator dan turbin angin diukur manual dengan tachometer.
- Arduino akan merekap data berupa tegangan listrik, arus listrik dan kecepatan putar generator selama 4 detik sekali, selanjutnya data tersebut ditampilkan pada papan *display*.
- Semua data pengujian ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik, yang selanjutnya diolah dan dianalisis.

## 5. Pengujian

- Data hasil pengujian model turbin angin tipe poros silang tanpa beban dengan sudut *pitch* sudu 20°.

- Kecepatan angin 5,3 m/s

**Tabel 7 Data Pengujian pada Sudut *Pitch* Sudu 20°**

No	Kecepatan angin 5,3 m/s			
	Putaran generator, $n_2$ (rpm)	Putaran turbin, $n_1$ (rpm)	Waktu (s)	$\omega$ turbin (rps)
1	0	0	0	0
2	88	9	4	1
3	715	69	8	7
4	1162	113	12	12
5	1072	104	16	11
6	1162	113	20	12
7	1339	130	24	14
8	1608	156	28	16
9	1519	147	32	15
10	2056	200	36	21
11	1699	165	40	17
12	2056	200	44	21
13	1968	191	48	20
14	1968	191	52	20
15	1786	173	56	18
16	1968	191	60	20
17	1788	174	64	18
18	1965	191	68	20
19	1878	182	72	19
20	1876	182	76	19

- Kecepatan angin 5,8 m/s

**Tabel 8 Data Pengujian pada Sudut *Pitch* Sudu 20°**

No	Kecepatan angin 5,8 m/s			
	Putaran generator, $n_2$ (rpm)	Putaran turbin, $n_1$ (rpm)	Waktu (s)	$\omega$ turbin (rps)
1	0	0	0	0
2	178	17	4	2
3	982	95	8	10
4	1339	130	12	14
5	1519	147	16	15
6	1698	165	20	17
7	1699	165	24	17
8	2236	217	28	23
9	2412	234	32	25
10	2503	243	36	25
11	1968	191	40	20
12	1876	182	44	19
13	2146	208	48	22
14	2056	200	52	21
15	2055	200	56	21
16	2056	200	60	21
17	2415	234	64	25
18	2146	208	68	22
19	2056	200	72	21
20	2233	217	76	23

3) Kecepatan angin 6,3 m/s

**Tabel 9 Data Pengujian pada Sudut *Pitch* Sudu 20°**

No	Kecepatan angin 6,3 m/s			
	Putaran generator, $n_2$ (rpm)	Putaran turbin, $n_1$ (rpm)	Waktu (s)	$\omega$ turbin (rps)
1	0	0	0	0
2	447	43	4	5
3	1164	113	8	12
4	2056	200	12	21
5	1965	191	16	20
6	2146	208	20	22
7	1965	191	24	20
8	2143	208	28	22
9	2415	234	32	25
10	2143	208	36	22
11	2596	252	40	26
12	2770	269	44	28
13	2238	217	48	23
14	2503	243	52	25
15	2503	243	56	25
16	2952	287	60	30
17	2590	251	64	26
18	2323	226	68	24
19	2325	226	72	24
20	2502	243	76	25

b. Data hasil pengujian model turbin angin tipe poros silang tanpa beban dengan sudut *pitch* sudu 25°

1) Kecepatan angin 5,3 m/s

**Tabel 10 Data Pengujian pada Sudut Pitch Sudu 25°**

No	Kecepatan angin 5,3 m/s			
	Putaran generator, $n_2$ (rpm)	Putaran turbin, $n_1$ (rpm)	Waktu (s)	$\omega$ turbin (rps)
1	0	0	0	0
2	447	43	4	5
3	1071	104	8	11
4	1071	104	12	11
5	1341	130	16	14
6	1608	156	20	16
7	1786	173	24	18
8	1521	148	28	15
9	1518	147	32	15
10	1786	173	36	18
11	1699	165	40	17
12	1608	156	44	16
13	1519	147	48	15
14	1431	139	52	15
15	1786	173	56	18
16	1429	139	60	15
17	1788	174	64	18
18	1432	139	68	15
19	1965	191	72	20
20	1965	191	76	20

2) Kecepatan angin 5,8 m/s

**Tabel 11 Data Pengujian pada Sudut Pitch Sudu 25°**

No	Kecepatan angin 5,8 m/s			
	Putaran generator, $n_2$ (rpm)	Putaran turbin, $n_1$ (rpm)	Waktu (s)	$\omega$ turbin (rps)
1	0	0	0	0
2	714	69	4	7
3	982	95	8	10
4	1431	139	12	15
5	1788	174	16	18
6	2056	200	20	21
7	1698	165	24	17
8	1786	173	28	18
9	1878	182	32	19
10	1608	156	36	16
11	1876	182	40	19
12	1791	174	44	18
13	2143	208	48	22
14	1788	174	52	18
15	2146	208	56	22
16	1878	182	60	19
17	1609	156	64	16
18	1786	173	68	18
19	2055	200	72	21
20	1788	174	76	18

3) Kecepatan angin 6,3 m/s

**Tabel 12 Data Pengujian pada Sudut *Pitch* Sudu 25°**

No	Kecepatan angin 6,3 m/s			
	Putaran generator, $n_2$ (rpm)	Putaran turbin, $n_1$ (rpm)	Waktu (s)	$\omega$ turbin (rps)
1	0	0	0	0
2	535	52	4	5
3	1429	139	8	15
4	1609	156	12	16
5	1876	182	16	19
6	2055	200	20	21
7	2059	200	24	21
8	2055	200	28	21
9	1968	191	32	20
10	2236	217	36	23
11	1876	182	40	19
12	1969	191	44	20
13	2055	200	48	21
14	1878	182	52	19
15	1878	182	56	19
16	1965	191	60	20
17	2143	208	64	22
18	2056	200	68	21
19	1788	174	72	18
20	2143	208	76	22

c. Data hasil pengujian model turbin angin tipe poros silang tanpa beban dengan sudut *pitch* sudu 30°

1) Kecepatan angin 5,3 m/s

**Tabel 13 Data Pengujian pada Sudut *Pitch* Sudu 30°**

No	Kecepatan angin 5,3 m/s			
	Putaran generator, $n_2$ (rpm)	Putaran turbin, $n_1$ (rpm)	Waktu (s)	$\omega$ turbin (rps)
1	0	0	0	0
2	1072	104	4	11
3	1251	121	8	13
4	1071	104	12	11
5	1341	130	16	14
6	1251	121	20	13
7	1429	139	24	15
8	1342	130	28	14
9	1162	113	32	12
10	1339	130	36	14
11	1341	130	40	14
12	1518	147	44	15
13	1429	139	48	15
14	1341	130	52	14
15	1518	147	56	15
16	1432	139	60	15
17	1786	173	64	18
18	1341	130	68	14
19	1518	147	72	15
20	1429	139	76	15

2) Kecepatan angin 5,8 m/s



**Tabel 14 Data Pengujian pada Sudut *Pitch* Sudu 30°**

No	Kecepatan angin 5,8 m/s			
	Putaran generator, $n_2$ (rpm)	Putaran turbin, $n_1$ (rpm)	Waktu (s)	$\omega$ turbin (rps)
1	0	0	0	0
2	625	61	4	6
3	1072	104	8	11
4	1432	139	12	15
5	1519	147	16	15
6	1698	165	20	17
7	1341	130	24	14
8	1429	139	28	15
9	1609	156	32	16
10	1431	139	36	15
11	1431	139	40	15
12	1788	174	44	18
13	1339	130	48	14
14	1518	147	52	15
15	1431	139	56	15
16	1788	174	60	18
17	1699	165	64	17
18	1878	182	68	19
19	1518	147	72	15
20	1432	139	76	15

3) Kecepatan angin 6,3 m/s

**Tabel 15 Data Pengujian pada Sudut *Pitch* Sudu 30°**

No	Kecepatan angin 6,3 m/s			
	Putaran generator, $n_2$ (rpm)	Putaran turbin, $n_1$ (rpm)	Waktu (s)	$\omega$ turbin (rps)
1	0	0	0	0
2	804	78	4	8
3	1071	104	8	11
4	1341	130	12	14
5	1339	130	16	14
6	1431	139	20	15
7	1611	156	24	16
8	1698	165	28	17
9	1609	156	32	16
10	1609	156	36	16
11	1431	139	40	15
12	1701	165	44	17
13	1698	165	48	17
14	1608	156	52	16
15	1788	174	56	18
16	1788	174	60	18
17	2055	200	64	21
18	1519	147	68	15
19	1698	165	72	17
20	1786	173	76	18

d. Data hasil pengujian model turbin angin tipe poros silang menggunakan 11 (sebelas) beban dengan sudut *pitch* sudu 20°

1) Kecepatan angin 5,3 m/s

**Tabel 16 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut *Pitch* Sudu 20°**

Beban	Kecepatan angin 5,3 m/s					
	Kecepatan putar poros (rpm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	TSR	Cp (%)
1	168	8,82	0,08	0,75	1,16	2,09
2	162	8,32	0,10	0,79	1,12	2,20
3	167	7,74	0,13	0,98	1,16	2,72
4	156	7,24	0,18	1,27	1,08	3,53
5	157	6,26	0,22	1,38	1,09	3,85
6	136	5,88	0,25	1,46	0,94	4,06
7	131	4,47	0,35	1,57	0,91	4,37
8	127	5,32	0,27	1,42	0,88	3,96
9	130	3,10	0,41	1,27	0,90	3,54
10	115	8,79	0,07	0,63	0,79	1,75
11	82	9,18	0,06	0,56	0,57	1,57

2) Kecepatan angin 5,8 m/s

**Tabel 17 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut *Pitch* Sudu 20°**

Beban	Kecepatan angin 5,8 m/s					
	Kecepatan putar poros (rpm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	TSR	Cp (%)
1	198	10,27	0,10	0,99	1,25	2,11
2	191	9,78	0,11	1,08	1,21	2,29
3	191	9,57	0,15	1,46	1,21	3,10
4	180	8,77	0,21	1,87	1,14	3,98
5	185	8,23	0,28	2,30	1,17	4,88
6	174	7,74	0,32	2,49	1,10	5,30
7	168	5,61	0,47	2,66	1,06	5,66
8	163	4,40	0,57	2,51	1,03	5,38
9	155	7,05	0,36	2,51	0,98	5,32
10	142	10,55	0,08	0,89	0,90	1,89
11	111	10,69	0,07	0,75	0,70	1,60

3) Kecepatan angin 6,3 m/s

**Tabel 18 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut *Pitch* Sudu 20°**

Beban	Kecepatan angin 6,3 m/s					
	Kecepatan putar poros (rpm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	TSR	Cp (%)
1	213	11,52	0,11	1,26	1,24	2,08
2	224	11,40	0,13	1,46	1,30	2,43
3	228	10,49	0,17	1,77	1,33	2,93
4	226	10,01	0,24	2,42	1,32	4,02
5	223	9,44	0,30	2,79	1,30	4,63
6	200	8,87	0,38	3,40	1,17	5,63
7	193	6,67	0,58	3,87	1,12	6,41
8	182	5,05	0,72	3,62	1,06	6,01
9	199	8,37	0,43	3,56	1,16	5,91
10	147	11,63	0,09	1,10	0,85	1,82
11	126	11,82	0,08	0,95	0,73	1,57

e. Data hasil pengujian model turbin angin tipe poros silang menggunakan 11 (sebelas) beban dengan sudut *pitch* sudu 25°

1) Kecepatan angin 5,3 m/s

**Tabel 19 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut *Pitch* Sudu 25°**

Beban	Kecepatan angin 5,3 m/s					
	Kecepatan putar poros (rpm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	TSR	Cp (%)
1	151	7,83	0,07	0,57	1,04	1,59
2	152	7,78	0,09	0,67	1,05	1,87
3	148	7,32	0,12	0,85	1,03	2,36
4	149	7,00	0,17	1,16	1,03	3,24
5	147	6,60	0,22	1,46	1,01	4,05
6	145	6,19	0,26	1,61	1,00	4,49
7	137	4,14	0,54	2,24	0,95	6,22
8	130	5,08	0,42	2,12	0,90	5,91
9	134	6,08	0,30	1,81	0,92	5,04
10	114	7,91	0,06	0,50	0,79	1,38
11	104	7,91	0,05	0,42	0,72	1,17

2) Kecepatan angin 5,8 m/s

**Tabel 20 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut *Pitch* Sudu 25°**

Beban	Kecepatan angin 5,8 m/s					
	Kecepatan putar poros (rpm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	TSR	Cp (%)
1	175	8,87	0,08	0,74	1,11	1,57
2	183	8,85	0,10	0,88	1,16	1,87
3	175	8,55	0,14	1,16	1,11	2,47
4	165	8,12	0,19	1,54	1,04	3,28
5	167	7,93	0,27	2,12	1,06	4,49
6	168	7,33	0,31	2,26	1,06	4,79
7	154	4,95	0,66	3,28	0,97	6,97
8	160	6,16	0,49	3,03	1,01	6,44
9	158	7,16	0,35	2,52	1,00	5,36
10	141	9,20	0,07	0,69	0,89	1,46
11	122	9,07	0,06	0,56	0,77	1,19

3) Kecepatan angin 6,3 m/s

**Tabel 21 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut *Pitch* Sudu 25°**

Beban	Kecepatan angin 6,3 m/s					
	Kecepatan putar poros (rpm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	TSR	Cp (%)
1	198	10,04	0,10	0,96	1,15	1,59
2	174	9,94	0,11	1,14	1,01	1,90
3	194	9,80	0,16	1,55	1,13	2,56
4	191	9,21	0,22	2,04	1,11	3,38
5	189	8,81	0,31	2,70	1,10	4,47
6	180	8,34	0,35	2,96	1,05	4,90
7	182	5,52	0,82	4,55	1,06	7,54
8	181	6,85	0,62	4,23	1,05	7,02
9	165	8,11	0,42	3,43	0,96	5,69
10	147	9,98	0,08	0,81	0,85	1,34
11	138	10,14	0,07	0,68	0,80	1,14

f. Data hasil pengujian model turbin angin tipe poros silang menggunakan 11 (sebelas) beban dengan sudut *pitch* sudu 30°

1) Kecepatan angin 5,3 m/s

**Tabel 22 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut *Pitch* Sudu 30°**

Beban	Kecepatan angin 5,3 m/s					
	Kecepatan putar poros (rpm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	TSR	Cp (%)
1	132	6,56	0,06	0,38	0,91	1,06
2	136	6,44	0,08	0,49	0,94	1,38
3	137	6,36	0,10	0,65	0,95	1,82
4	141	6,06	0,15	0,90	0,97	2,50
5	139	5,62	0,20	1,11	0,96	3,10
6	134	5,39	0,24	1,27	0,92	3,54
7	117	3,38	0,50	1,70	0,81	4,74
8	127	4,18	0,37	1,56	0,88	4,35
9	120	5,13	0,27	1,37	0,83	3,82
10	107	6,70	0,06	0,37	0,74	1,03
11	88	6,85	0,05	0,32	0,61	0,89

2) Kecepatan angin 5,8 m/s

**Tabel 23 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut *Pitch* Sudu 30°**

Beban	Kecepatan angin 5,8 m/s					
	Kecepatan putar poros (rpm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	TSR	Cp (%)
1	153	7,76	0,07	0,58	0,96	1,22
2	160	7,58	0,09	0,67	1,01	1,42
3	148	7,49	0,12	0,90	0,94	1,92
4	149	7,09	0,17	1,23	0,94	2,61
5	154	6,58	0,23	1,53	0,98	3,25
6	146	6,43	0,28	1,79	0,92	3,79
7	133	4,12	0,62	2,57	0,84	5,47
8	140	5,12	0,46	2,34	0,88	4,97
9	122	6,07	0,32	1,93	0,77	4,09
10	119	7,83	0,06	0,49	0,75	1,05
11	105	7,94	0,05	0,43	0,66	0,90

3) Kecepatan angin 6,3 m/s

**Tabel 24 Data Pengujian Menggunakan 11 (Sebelas) Beban dengan Sudut *Pitch* Sudu 30°**

Beban	Kecepatan angin 6,3 m/s					
	Kecepatan putar poros (rpm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	TSR	Cp (%)
1	173	8,26	0,08	0,66	1,00	1,10
2	162	8,43	0,10	0,82	0,94	1,37
3	179	8,18	0,13	1,09	1,04	1,80
4	167	7,94	0,19	1,52	0,97	2,51
5	166	7,42	0,26	1,96	0,96	3,25
6	163	6,93	0,30	2,10	0,95	3,48
7	159	5,87	0,53	3,10	0,92	5,14
8	146	4,57	0,67	3,08	0,85	5,11
9	150	6,71	0,36	2,39	0,87	3,95
10	141	8,56	0,07	0,59	0,82	0,98
11	114	8,65	0,06	0,50	0,67	0,83

## 6. Pembahasan

### a. Daya angin

Daya angin yang diterima turbin angin dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3$$

- Kecepatan angin 5,3 m/s

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 = \frac{1}{2} (1,15 \text{ kg/m}^3)(0,42 \text{ m}^2)(5,3 \text{ m/s})^3 = 35,95 \text{ W}$$

- Kecepatan angin 5,8 m/s

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 = \frac{1}{2} (1,15 \text{ kg/m}^3)(0,42 \text{ m}^2)(5,8 \text{ m/s})^3 = 47,12 \text{ W}$$

- Kecepatan angin 6,3 m/s

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 = \frac{1}{2} (1,15 \text{ kg/m}^3)(0,42 \text{ m}^2)(6,3 \text{ m/s})^3 = 60,39 \text{ W}$$

b. Perbandingan kecepatan putar poros turbin angin

Sistem transmisi rantai dan roda gigi sproket yang digunakan pada pengujian turbin angin ini menggunakan perbandingan roda gigi 72:7 atau 10,3. Perbandingan kecepatan putar poros turbin angin dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$n_1 = \frac{n_2}{GR}$$

- Pada kecepatan putar 0 rpm

$$n_1 = \frac{n_2}{GR} = \left( \frac{0}{10,3} \right) = 0 \text{ rpm}$$

- Pada kecepatan putar 1518 rpm

$$n_1 = \frac{n_2}{GR} = \left( \frac{1518}{10,3} \right) = 147 \text{ rpm}$$

Perhitungan lainnya telah dilakukan pada MS Excel dan ditampilkan pada tabel pengujian di atas.

c. Kecepatan tangensial turbin angin

Kecepatan tangensial turbin angin dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

- Pada kecepatan putar 0 rpm

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2(3,14)(0 \text{ rpm})}{60 \text{ s}} = 0 \text{ rad/s}$$

- Pada kecepatan putar 147 rpm

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2(3,14)(147 \text{ rpm})}{60 \text{ s}} = 15 \text{ rad/s}$$

Perhitungan lainnya telah dilakukan pada MS Excel dan ditampilkan pada tabel pengujian di atas.

d. *Tip speed ratio*

*Tip speed ratio* dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$TSR = \frac{\omega r}{V}$$

Pada kecepatan angin 5,3 m/s dan sudut *pitch* sudu 20° terdapat kecepatan putar turbin minimum 82 rpm dan kecepatan putar turbin maksimum 168 rpm.

- $TSR = \frac{\omega r}{V} = \frac{(8,63 \text{ rad/s})(0,35 \text{ m})}{5,3 \text{ m/s}} = 0,57$
- $TSR = \frac{\omega r}{V} = \frac{(17,62 \text{ rad/s})(0,35 \text{ m})}{5,3 \text{ m/s}} = 1,16$

Perhitungan lainnya telah dilakukan pada MS Excel dan ditampilkan pada tabel pengujian di atas.

e. Daya listrik turbin angin

Daya listrik yang dihasilkan oleh turbin angin dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$P_e = V \cdot I$$

Pada sudut *pitch* sudu 20° dan kecepatan angin 5,3 m/s, terdapat tegangan maksimum 9,18 V dan tegangan minimum 3,10 V.

- $P_e = V \cdot I = (9,18 \text{ V})(0,06 \text{ A}) = 0,56 \text{ W}$
- $P_e = V \cdot I = (3,10 \text{ V})(0,41 \text{ A}) = 1,27 \text{ W}$

Perhitungan lainnya telah dilakukan pada MS Excel dan ditampilkan pada tabel pengujian di atas.

f. Koefisien peformansi

Koefisien performansi model turbin angin didapat dari persamaan di bawah ini:

$$C_p = \frac{P_e}{P} \times 100\%$$

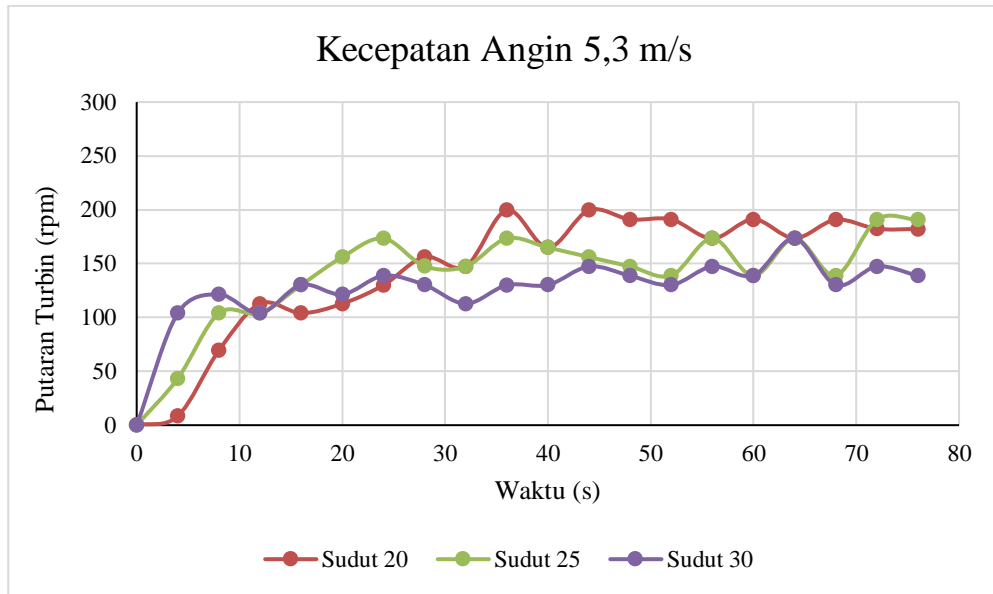
Pada kecepatan angin 5,3 m/s dan sudut *pitch* sudu 20° daya yang masuk yaitu 35,95 W, daya keluar angin minimum 0,56 W serta daya keluar angin maksimum 1,27 W.

- $C_p = \frac{P_e}{P} \times 100\% = \left( \frac{0,56 \text{ W}}{35,95 \text{ W}} \right) \times 100\% = 1,57\%$

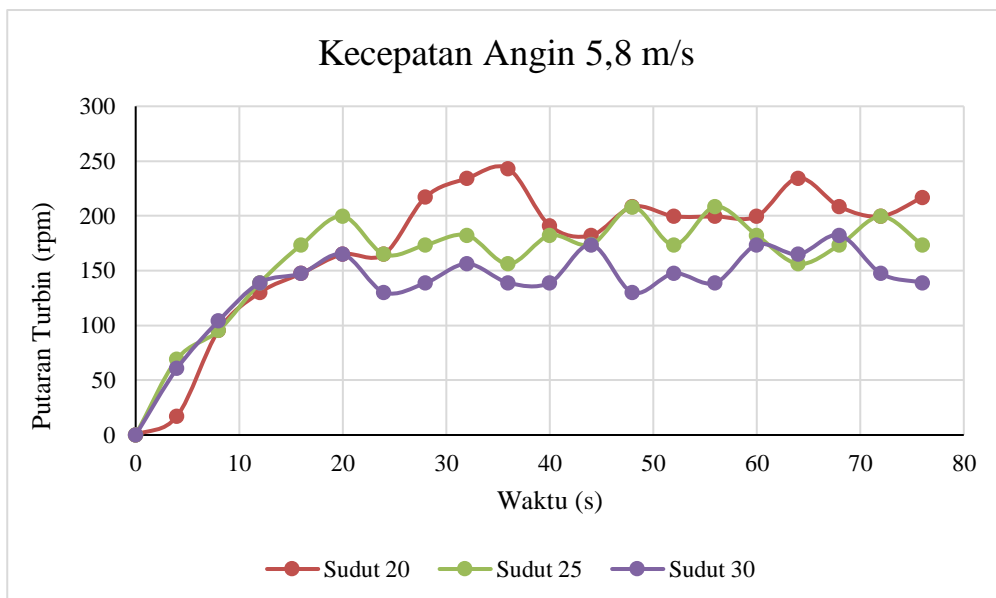
- $C_p = \frac{P_e}{P} \times 100\% = \left( \frac{1,27 W}{35,95 W} \right) \times 100\% = 3,54\%$

Perhitungan lainnya telah dilakukan pada MS Excel dan ditampilkan pada tabel pengujian di atas.

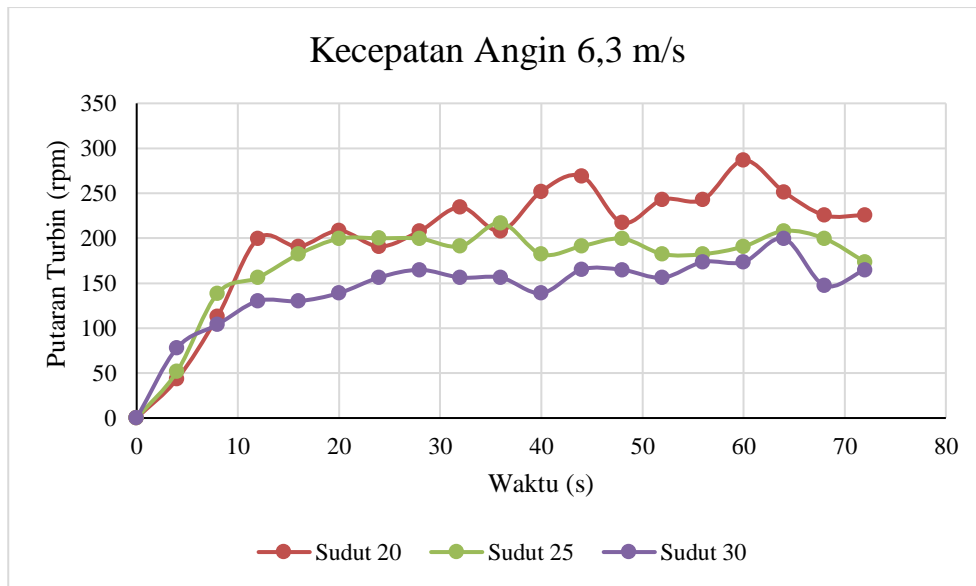
Setelah melakukan pengolahan data hasil pengujian performansi model turbin angin tipe poros silang, selanjutnya data pengujian tanpa beban diolah menjadi kurva kecepatan putaran poros terhadap waktu. Kurva tersebut dapat dilihat pada Gambar 18, 19, dan 20 di bawah ini:



Gambar 18 Grafik Kecepatan Putar Poros Turbin Terhadap Waktu

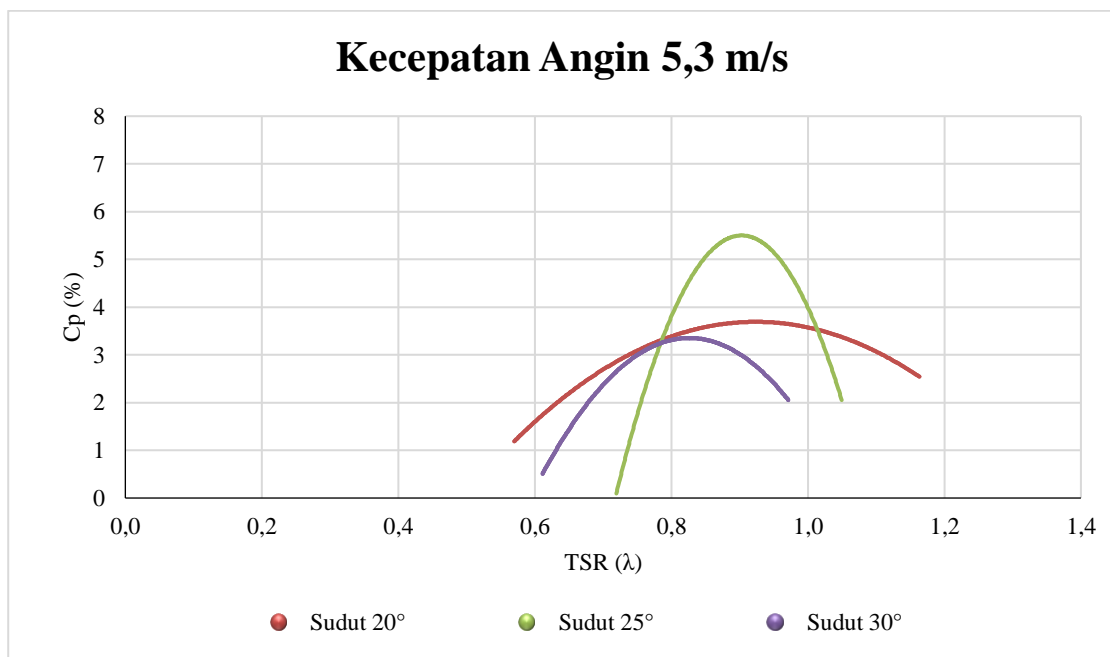


Gambar 19 Grafik Kecepatan Putar Poros Turbin Terhadap Waktu



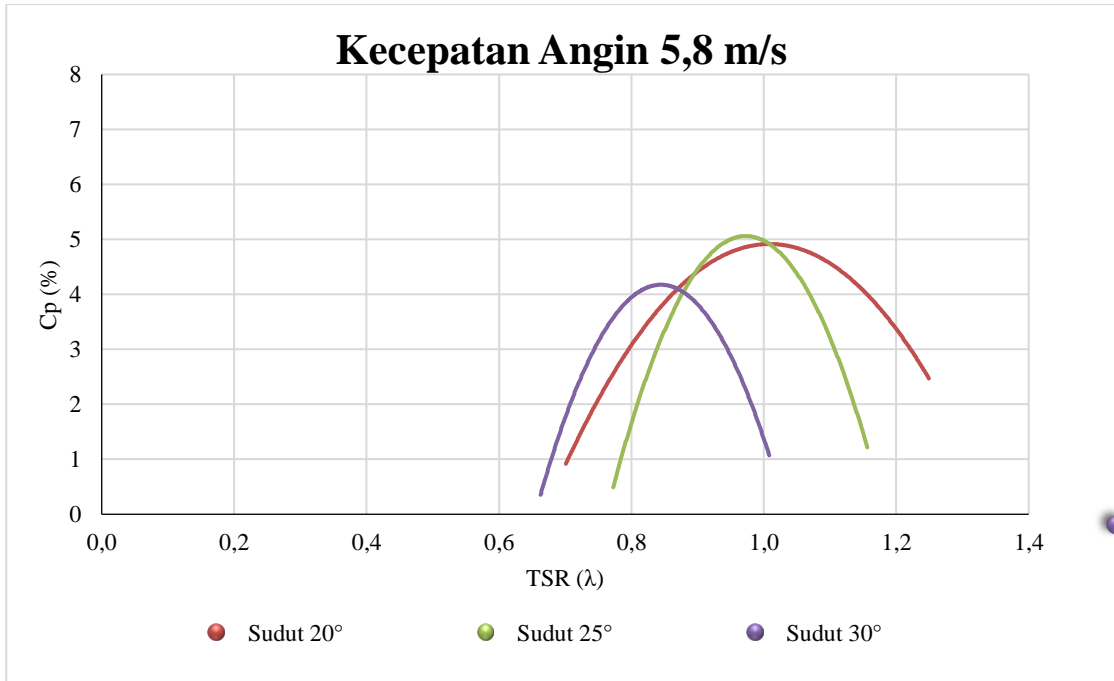
**Gambar 20 Grafik Kecepatan Putar Poros Turbin Terhadap Waktu**

Setelah melakukan pengolahan data hasil pengujian performansi model turbin angin tipe poros silang, selanjutnya data pengujian menggunakan beban diolah menjadi kurva koefisien performansi terhadap *tip speed ratio*. Kurva tersebut dapat dilihat pada Gambar 21, 22, dan 23 di bawah ini:

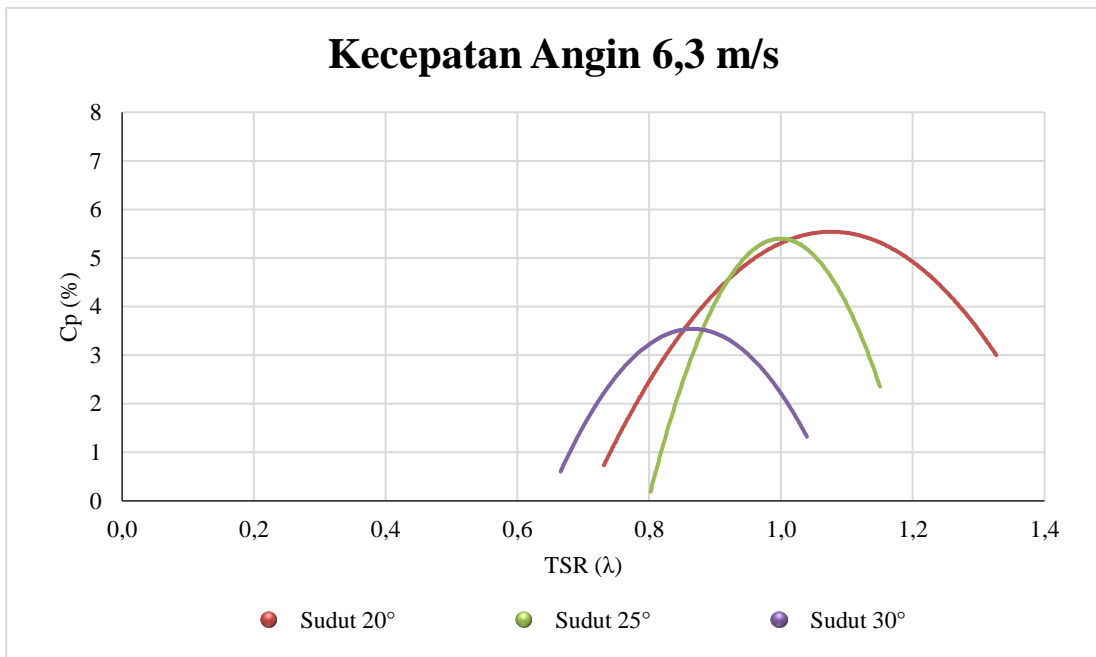


**Gambar 21 Grafik Cp Terhadap TSR**





Gambar 22 Grafik Cp Terhadap TSR



Gambar 23 Grafik Cp Terhadap TSR

## 7. Analisis

Data hasil pengujian performansi model turbin angin tipe poros silang diperoleh data berupa kecepatan putar poros turbin angin, kecepatan tangensial, *tip speed ratio*, daya listrik, dan koefisien performansi. Parameter tersebut dihitung untuk setiap posisi sudut *pitch* sudu horizontal dan kecepatan angin yang bervariasi. Hasil perhitungan akan dinyatakan dalam grafik koefisien performansi terhadap *tip speed ratio*.

```
1,15/02/2023,11:11:26,1341,4.68,335.50,1570.14  
2,15/02/2023,11:11:30,1162,4.64,343.00,1675.04  
3,15/02/2023,11:11:34,1161,4.50,371.00,1650.95  
4,15/02/2023,11:11:38,1162,4.06,325.00,1319.50  
5,15/02/2023,11:11:42,1251,4.60,371.00,1706.60  
6,15/02/2023,11:11:46,1162,4.22,352.00,1485.44  
7,15/02/2023,11:11:50,892,4.71,369.50,1740.34  
8,15/02/2023,11:11:54,1341,4.15,346.00,1435.90  
9,15/02/2023,11:11:58,1071,4.47,342.00,1528.74  
10,15/02/2023,11:12:02,1251,4.66,360.50,1679.93
```

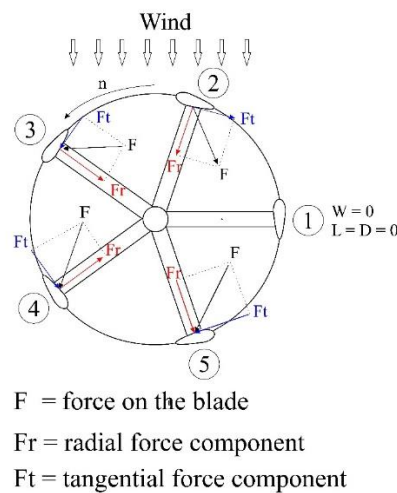
```
1,15/02/2023,11:12:24,894,3.45,433.50,1495.57  
2,15/02/2023,11:12:28,804,2.92,392.50,1146.10  
3,15/02/2023,11:12:32,804,3.24,431.00,1396.44  
4,15/02/2023,11:12:36,715,3.22,427.00,1374.94  
5,15/02/2023,11:12:40,984,3.17,421.00,1334.57  
6,15/02/2023,11:12:44,714,3.23,401.00,1295.23  
7,15/02/2023,11:12:48,894,2.83,394.50,1116.43  
8,15/02/2023,11:12:52,894,2.99,439.50,1314.10  
9,15/02/2023,11:12:56,984,3.10,390.00,1209.00  
10,15/02/2023,11:13:00,804,2.80,369.00,1033.20
```

Gambar 24 Data Pengujian Menggunakan Beban 10 (Sepuluh) dan Beban 11 (Sebelas)

Gambar di atas merupakan data hasil pengujian dengan menggunakan pembebanan listrik pada kecepatan angin 5,3 m/s dan sudut *pitch* sudu 20°. Pada pembebanan ke-11 (sebelas) putaran generator DC berada di bawah 1000 rpm, dan generator mampu membangkitkan listrik pada kecepatan putar 715 rpm. Hal tersebut membuktikan bahwa pengembangan dinamometer generator DC berhasil menyelesaikan permasalahan penelitian sebelumnya. Di mana pada penelitian sebelumnya generator tidak mampu membangkitkan ketika putaran di bawah 1000 rpm.

Grafik Cp vs TSR dengan kecepatan angin 5,3 m/s, setiap kecepatan angin konstan dengan sudut *pitch* sudu horizontal 20°, 25°, dan 30°. Koefisien performansi mengalami kenaikan pada setiap sudutnya, seperti pada sudut 20° memiliki nilai Cp sebesar 3,54%, sudut 25° memiliki nilai Cp sebesar 6,22%, dan sudut 30° memiliki nilai Cp sebesar 4,74%. Dari ke 3 (tiga) grafik Cp vs TSR di atas, koefisien performansi maksimum terdapat pada kecepatan angin 6,3 m/s dengan sudut *pitch* sudu 25° sebesar 7,54%, dan koefisien performansi minimum terdapat pada kecepatan angin 6,3 m/s dengan sudut *pitch* sudu 30° sebesar 0,83%. Kenaikan Koefisien performansi

dipengaruhi oleh *lift* dan *drag* sudu horizontal, sehingga setiap energi angin yang diterima sudu horizontal memiliki koefisien performansi yang berbeda, seperti pada sudut *pitch* sudu  $25^\circ$  yang memiliki nilai koefisien performansi lebih besar dari sudut *pitch* sudu  $30^\circ$ . Hal tersebut terjadi karena pada sudut  $25^\circ$  memiliki *lift* yang lebih besar dari sudut  $30^\circ$ , dan *drag* lebih kecil yang mengakibatkan terjadinya torsi sehingga turbin angin dapat berputar. Pada saat jumlah rotasi mencapai nilai maksimum, konversi energi kinetik angin menjadi energi putaran poros turbin angin mencapai performansi tertinggi. Performansi tertinggi yang dicapai turbin angin dinyatakan dengan koefisien performansi maksimum. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



**Gambar 25 Gaya yang Bekerja pada Turbin Angin**

Berdasarkan gambar di atas gaya resultan mempengaruhi torsi, gaya resultan terdiri dari komponen tangen sial dan komponen radial. Komponen tangensial berperan penting untuk menimbulkan torsi, semakin besar komponen tangensial yang sejajar dengan arah angin maka semakin besar pula gara resultan yang menyebabkan torsi. Hal tersebut berlaku ketika gaya resultan yang bekerja pada sudu arahnya sejajar dengan arah angin sehingga masing-masing gaya resultan saling menguatkan.

Grafik  $C_p$  vs TSR dengan kecepatan angin 5,3 m/s, setiap kecepatan angin konstan dengan sudut *pitch* sudu horizontal  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ , dan  $30^\circ$ . *Tip speed ratio* mengalami penurunan pada setiap sudutnya, seperti pada sudut  $20^\circ$  memiliki nilai TSR sebesar 1,79, sudut  $25^\circ$  memiliki nilai TSR sebesar 1,53, dan sudut  $30^\circ$  memiliki nilai TSR sebesar 1,4. Penurunan *tip speed ratio* disebabkan oleh pembeban listrik yang mengakibatkan penurunan kecepatan putar poros turbin angin. Dari ke 3 (tiga) grafik  $C_p$  vs TSR di atas, *tip speed ratio* minimum terdapat pada kecepatan angin 5,3 m/s dengan sudut *pitch* sudu  $20^\circ$  sebesar 0,57, dan *tip speed ratio* maksimum terdapat pada kecepatan angin 6,3 m/s dengan sudut *pitch* sudu  $20^\circ$  sebesar 1,33.

Pada kurva kecepatan putar poros terhadap waktu yang direkam oleh data arduino pada setiap sudut *pitch*. Pada kecepatan angin 5,3 m/s memerlukan waktu 40 s untuk mencapai putaran poros konstan. Pada kecepatan angin 6,3 m/s memerlukan waktu 30 s untuk mencapai putaran poros konstan. Pada kecepatan angin 5,3 m/s, daya angin yang masuk sebesar 35,95 W dan daya listrik maksimum terdapat pada sudut *pitch* sudu  $25^\circ$  sebesar 2,24 W. Pada kecepatan angin 5,8 m/s, daya angin yang masuk sebesar 47,12 W dan daya listrik maksimum terdapat pada sudut *pitch* sudu  $30^\circ$  sebesar 2,57 W. Pada kecepatan angin 6,3 m/s, daya angin yang masuk sebesar 60,39 W dan daya listrik maksimum terdapat pada sudut *pitch* sudu  $25^\circ$  sebesar 4,55 W. Dapat dianalisis bahwa terjadi rugi-rugi pada turbin angin seperti beban material turbin dan pengaruh sistem transmisi, hal tersebut mempengaruhi putaran generator sehingga daya listrik yang keluar lebih kecil dari daya angin yang masuk.

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

### **1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis performansi model turbin angin tipe poros silang dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Dinamometer generator hasil pengembangan dapat membangkitkan listrik pada putaran di bawah 1000 rpm. Arus dan tegangan listrik keluaran dinamometer generator dapat diukur.
- b. Daya listrik maksimum keluaran dinamometer generator yaitu sebesar 4,55 W pada kecepatan angin 6,3 m/s dan sudut *pitch* sudu 25°.
- c. Kecepatan angin 6,3 m/s membutuhkan waktu yang lebih pendek untuk mencapai kecepatan putar konstan yaitu dengan waktu sekitar 30 s.
- d. Koefisien performansi maksimum sebesar 7,54% pada kecepatan angin 6,3 m/s dengan sudut *pitch* sudu 25° dan TSR sebesar 1,06.

### **2. Saran**

Berdasarkan kesimpulan yang dikemukakan di atas, maka saran untuk pengembangan hasil penelitian ini lebih difokuskan pada modifikasi dinamometer generator dengan daya dan putaran yang lebih rendah.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Endang, B. Fajar, S. H. Winoto, dan I. Lufti, "Preliminary Test on Cross Axis Type Wind Turbine," *Adv Sci Lett*, vol. 24, no. 12, hlm. 9620–9622, Nov 2018, doi: 10.1166/asl.2018.13093.
- [2] W. K. Muzammil *dkk.*, "Design and Early Development of a Novel Cross Axis Wind Turbine," dalam *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, hlm. 668–674. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.373.
- [3] W. T. Chong, M. Gwani, C. J. Tan, W. K. Muzammil, S. C. Poh, dan K. H. Wong, "Design and testing of a novel building integrated cross axis wind turbine," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 7, no. 3, 2017, doi: 10.3390/app7030251.
- [4] J. M. Pinar Pérez, F. P. García Márquez, A. Tobias, dan M. Papaelias, "Wind Turbine Reliability Analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23. Elsevier Ltd, hlm. 463–472, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2013.03.018.
- [5] F. Spinato, P. J. Tavner, G. J. W. Van Bussel, dan E. Koutoulakos, "Reliability of Wind Turbine Subassemblies," *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 4, hlm. 387–401, 2009, doi: 10.1049/iet-rpg.2008.0060.
- [6] M. K. Johari, M. A. A. Jalil, dan M. F. M. Shariff, "Comparison of Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) and Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)," *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, vol. 7, no. 4, hlm. 74–80, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i4.13.21333.
- [7] C. A. Walford, "Wind Turbine Reliability: Understanding and Minimizing Wind Turbine Operation and Maintenance Costs," California, 2006. [Daring]. Tersedia pada: [www.onlinedoctranslator.com](http://www.onlinedoctranslator.com)
- [8] L. E. M. Lignarolo, D. Ragni, C. Krishnaswami, Q. Chen, C. J. Simão Ferreira, dan G. J. W. van Bussel, "Experimental Analysis of the Wake of a Horizontal Axis Wind Turbine Model," *Renew Energy*, vol. 70, hlm. 31–46, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.01.020.
- [9] R. Sumiati, K. Amri, dan Hanif, "Rancang Bangun Micro Turbin Angin Pembangkit Listrik Untuk Rumah Tinggal Di Daerah Kecepatan Angin Rendah," *Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, hlm. 1–5, Nov 2014.
- [10] B. Mahendra, R. Soenoko, dan D. Sutikno, "Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius Type L," Malang, 2013.

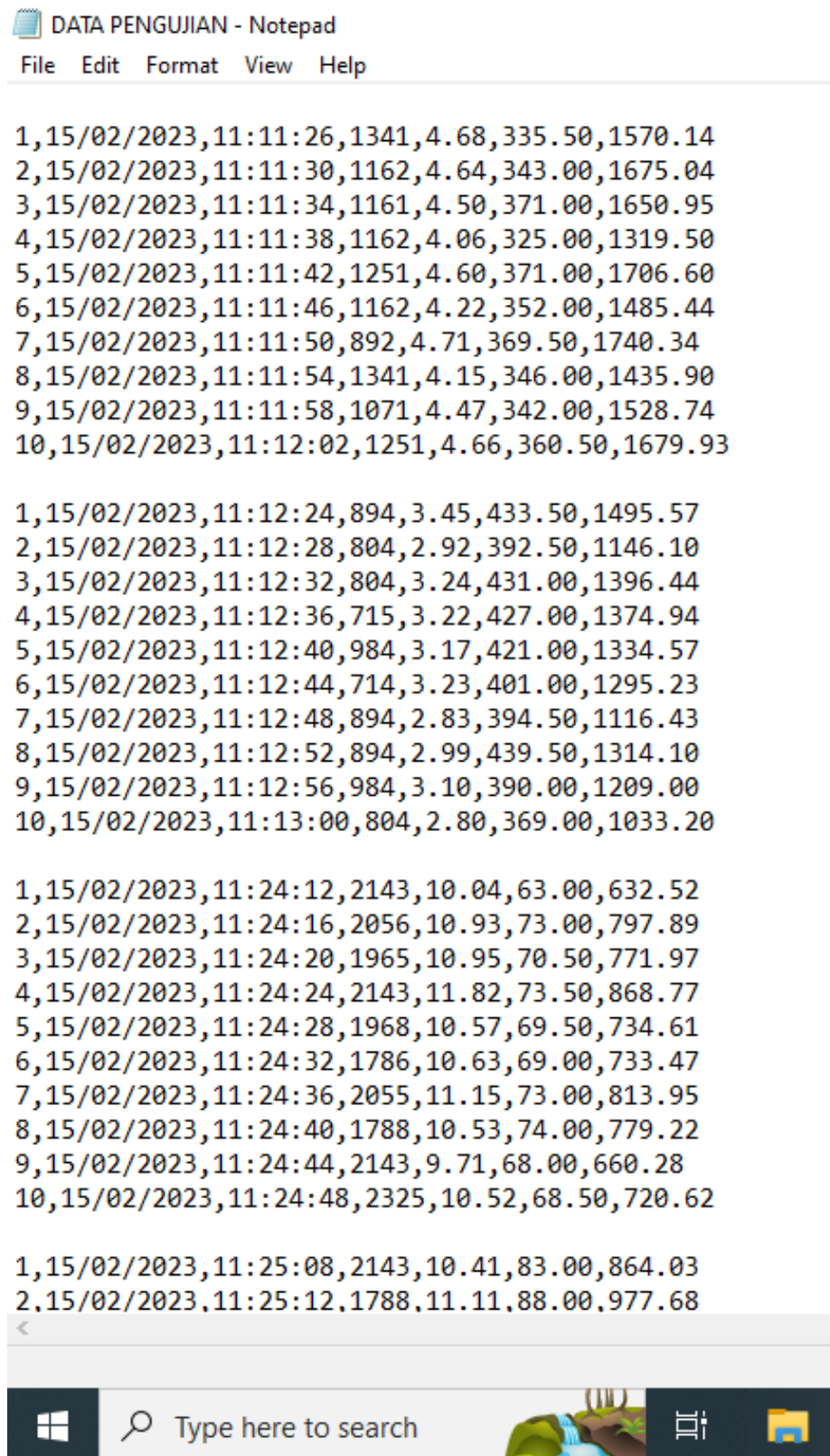
- [11] A. Kusiak dan W. Li, "The Prediction and Diagnosis of Wind Turbine Faults," *Renew Energy*, vol. 36, no. 1, hlm. 16–23, Jan 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.05.014.
- [12] R. Sumiati dan A. Zamri, "Rancang Bangun Miniatur Turbin Angin Pembangkit Listrik Untuk Media Pembelajaran," Padang, 2013.
- [13] Sahid, *Kaji Eksperimental Kinerja Turbin Crossflow Berbasis Konstruksi Silinder (Drum) Poros Vertikal Untuk Potensi Arus Sungai*. 2012.
- [14] A. Patricia dan A. Bose, "Stability Simulation of Wind Turbine Systems," vol. 102, hlm. 3791–3795, 1983.
- [15] M. Jureczko dan M. Mrówka, "Multi Objective Optimization of Composite Wind Turbine Blade," *Materials*, vol. 15, no. 13, Jul 2022, doi: 10.3390/ma15134649.
- [16] F. Scheurich, T. M. Fletcher, dan E. B. Richard, "Simulating the Aerodynamic Performance and Build Dynamics of a Vertical Axis Wind Turbine," United Kingdom, 2011. [Daring]. Tersedia pada: [www.onlinedoctranslator.com](http://www.onlinedoctranslator.com)
- [17] A. M. Arsad dan F. Hartono, "Pembuatan Kode Desain dan Analisis Turbin Angin Sumbu Vertikal Darrieus Tipe-H," Bandung, 2010.
- [18] F. Andika dan F. Astuti, "Pengaruh Sudut *Pitch* pada Blade Terhadap Kinerja Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Darrieus-H Naca 3412," Malang, Nov 2019.
- [19] P. Gulve dan S. B. Dr. Barve, "Design and Construction of Vertical Axis Wind Turbine," Pune, India, Okt 2014. [Daring]. Tersedia pada: [www.jifactor.com](http://www.jifactor.com)
- [20] M. R. Robiansyah, "Perancangan Kontroler Untuk Turbin Angin Skala Kecil," vol. 2, hlm. E6–E16, 2017.
- [21] L. J. Vermeer, J. N. Sørensen, dan A. Crespo, "Wind Turbine Wake Aerodynamics," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 39, no. 6–7. Elsevier Ltd, hlm. 467–510, 2003. doi: 10.1016/S0376-0421(03)00078-2.
- [22] Jamal, "Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Savonius," *INTEK: Jurnal Penelitian*, vol. 6, no. 1, hlm. 64, Mei 2019, doi: 10.31963/intek.v6i1.1127.
- [23] A. Marabdi Siregar dan F. Lubis, "Uji Keandalan Prototype Turbin Angin Savonius Tipe-Usebagai Pembangkit Listrik Alternatif," Sumatra Utara, Mei 2019.
- [24] P. J. Schubel dan R. J. Crossley, "Wind Turbine Blade Design," *Energies*, vol. 5, no. 9. MDPI AG, hlm. 3425–3449, 2012. doi: 10.3390/en5093425.

- [25] S. Gunawan, H. Hasan, dan S. Januariyansah, “Perbandingan Kinerja Mesin Sistem Konvensional dan Injeksi Menggunakan Generator Sebagai Dinamometer,” Medan, 2021. [Daring]. Tersedia pada: <https://jurnal.unimed.ac.id/2012/index.php/roda>
- [26] W. Jewell dan T. Hardy, *Emulation of a 1.5MW Wind Turbine with a DC Motor*. 2011.
- [27] B. Santoso, B. Gilang, dan Danardono, “Dinamometer Generator AC 10 KW Pengukur Unjuk Kerja Mesin Sepeda Motor 100 CC,” Banjarmasin, Okt 2015. [Daring]. Tersedia pada: [www.onlinedoctranslator.com](http://www.onlinedoctranslator.com)
- [28] W. Musikal, B. Mcniff, dan I. R. Mcniff, “Wind Turbine Testing in the NREL Dynamometer Test Bed,” 2000. [Daring]. Tersedia pada: <http://www.doe.gov/bridge>
- [29] Y. Guo dan J. Keller, “Investigation of High-Speed Shaft Bearing Loads in Wind Turbine,” *National Wind Technology Center*, hlm. 1–11, 2017.
- [30] N. Sinaga dan A. Dewangga, “Pengujian Dan Pembuatan Buku Petunjuk Operasi Chassis Dinamometer Tipe Water Brake,” *Rotasi*, vol. 14, hlm. 8–12, Jul 2012.
- [31] G. S. Fajar, R. Prasetyo, D. Mahendra, dan S. Yatmono, “Mokelis Kids Modul Edukasi Listrik Sebagai Media Pembelajaran Keselamatan Listrik Anak Usia Dini,” *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 3, no. 1, 2019, [Daring]. Tersedia pada: <http://journal.uny.ac.id/index.php/jee/>
- [32] S. Suhaeb *dkk.*, “Mikrokontroler dan Interace,” Makasar, 2017.



# LAMPIRAN

## 1. Data Pengujian



Gambar 26 Data Hasil Pengujian yang Terekap oleh Arduino

## 2. Foto-Foto Kegiatan



Gambar 27 Instalasi Pengujian



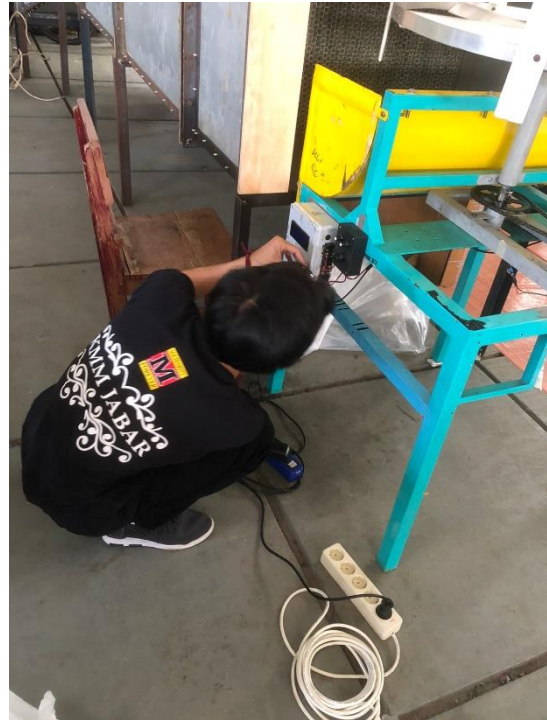
Gambar 28 Terowongan Angin (*Wind Tunnel*)



**Gambar 29 Pelumasan Sistem Transmisi Daya**



**Gambar 30 Sensor Kecepatan Putaran**



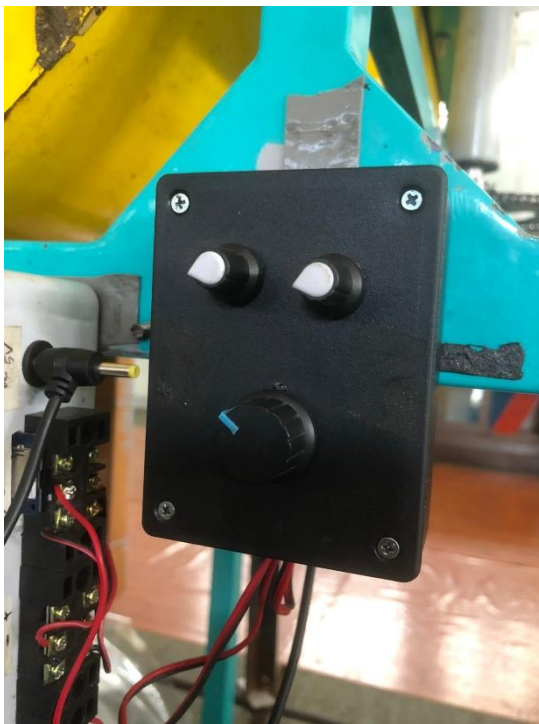
Gambar 31 *Setup Mikrokontroler*



Gambar 32 *Mengatur Sudut Pitch Sudu Horizontal Menggunakan Busur Derajat*



Gambar 33 Tampilan *Display* Mikrokontroler



Gambar 34 Mengatur Beban Listrik



Gambar 35 Mengatur Frekuensi Inverter



Gambar 36 Tempat SD Card Pada Mikrokontroler



Gambar 37 Proses Pengambilan Data