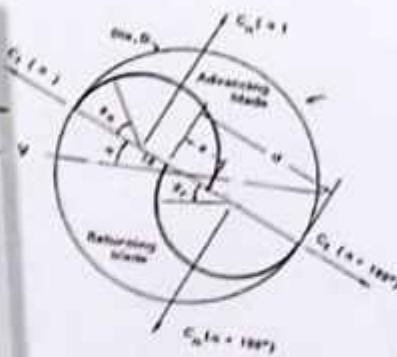


# TURBIN ANGIN

SUMBU VERTIKAL  
BERBASIS  
**DRAG FORCES**

Indra Herlamba Siregar  
Mohammad Effendy  
Akhmad Hafizh Ainur Rasyid



## **UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta**

### **Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### **Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

# **TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL BERBASIS *DRAG FORCES***

Indra Herlamba Siregar  
Mohammad Effendy  
Akhmad Hafizh Ainur Rasyid



**TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL BERBASIS DRAG FORCES**

**Indra Herlamba Siregar, Mohammad Effendy & Akhmad Hafizh Ainur Rasyid**

Desain Cover :  
**Rulie Gunadi**

Sumber :  
Penulis

Tata Letak :  
**Amira Dzatin Nabila**

Proofreader :  
**Avinda Yuda Wati**

Ukuran :  
viii, 75 hlm, Uk: 15.5x23 cm

ISBN :  
978-623-02-1794-4

Cetakan Pertama :  
November 2020

Hak Cipta 2020, Pada Penulis

---

Isi diluar tanggung jawab percetakan

---

**Copyright © 2020 by Deepublish Publisher**  
All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang  
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau  
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini  
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT DEEPUBLISH**  
**(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)**  
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman  
Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581  
Telp/Faks: (0274) 4533427  
Website: [www.deepublish.co.id](http://www.deepublish.co.id)  
[www.penerbitdeepublish.com](http://www.penerbitdeepublish.com)  
E-mail: [cs@deepublish.co.id](mailto:cs@deepublish.co.id)

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah penyusun panjatkan kepada Allah Swt., atas karunia yang diberikan kepada penyusun sehingga buku ajar hasil penelitian yang berjudul *Turbin Angin Sumbu Vertikal Berbasis Drag Forces* dapat kita selesaikan.

Buku ini disusun berdasarkan hasil penelitian dari tim penulis yang didanai melalui skema Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi dari tahun 2018 sampai dengan 2020, di mana secara garis besar buku ini membahas energi angin yang berisikan latar belakang dan potensi energi angin di Indonesia, kemudian parameter uji dan instrumen yang digunakan dalam penelitian yang berisikan parameter uji, alat dan berbagai instrumen yang digunakan dalam penelitian, berikutnya membahas model turbin yang dikembangkan oleh tim penulis berupa model yang didesain dengan celah di bilah yang bertujuan untuk mengurangi torsi negatif pada bilah cembung serta yang terakhir membahas model yang didesain dengan bilah tandem sebagai bilah pengganggu yang bertujuan untuk mengakselerasi aliran dan mengubah jenis aliran yang menerpa permukaan bilah utama.

Meskipun dalam penyusunan bahan ajar ini penyusun telah berusaha sekuat tenaga dan pikiran demi terwujudnya sebuah bahan ajar yang baik dan lengkap, namun penyusun juga menyadari akan beberapa keterbatasan yang melingkupi penyusun. Karena itu, pada kesempatan ini penyusun sangat mengharapkan tegur sapa atau saran-saran dari semua pihak untuk perbaikan pada isi bahan ajar ini.

Akhir kata penyusun dengan senang hati menerima koreksi dan tambahan dari pembaca dalam penyempurnaan bahan ajar dari turbin angin sumbu vertikal berbasis *drag forces*.

Surabaya, September 2020

Penulis

# DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI .....	vi
1. ENERGI ANGIN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Potensi Energi Angin di Indonesia.....	3
2. PARAMETER UJI MODEL DAN ALAT SERTA INSTRUMEN.....	7
2.1. Parameter Uji Model .....	7
2.2. Karakteristik Aerodinamis Model.....	9
2.3. Alat dan Instrumen.....	11
3. MODEL TURBIN ANGIN BERBASIS DRAG FORCES DENGAN CELAH DI BILAH.....	18
3.1. Cela pada Bilah dengan Bukaan Sudut Tertentu.....	18
3.2. Perbandingan Cela pada Bilah dengan Bukaan Sudut Tertentu dan Cela pada Bilah dengan Berayun Bebas .....	24
3.3. Efek Penambahan Pengarah Angin Tipe <i>Pluit</i> Box terhadap Kinerja Bilah dengan Plat Berayun Bebas .....	31
3.4. Efek Penambahan Pengarah Angin Jenis <i>Omnidirectional Guide Vanes</i> terhadap Kinerja Bilah dengan Plat Berayun Bebas.....	34
3.5. Efek Penambahan Pengarah Angin Jenis <i>Omnidirectional Guide Vanes</i> terhadap Distribusi Tekanan pada Permukaan Bilah dengan Plat Berayun Bebas .....	42

<b>4. MODEL TURBIN ANGIN BERBASIS DRAG FORCES DENGAN BILAH TANDEM .....</b>	<b>52</b>
4.1. Bilah Tandem Ganda dengan Jarak CelaH antara taNdem Tetap dan Jarak Bilah Tandem dengan Bilah Utama Berubah.....	52
4.2. Rasio Luasan Bilah Tandem Ganda sebagai Bilah Pengganggu terhadap Luasan Bilah Utama.....	57
4.3. Efek Penambahan Pengarah Angin Jenis <i>Omnidirectional Guide Vanes</i> terhadap Kinerja Model dengan Bilah Tandem sebagai Pengganggu dengan Sudut Busur $60^{\circ}$ .....	63
<b>SUMBER PUSTAKA.....</b>	<b>69</b>
<b>GLOSARIUM .....</b>	<b>71</b>
<b>INDEKS .....</b>	<b>72</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>75</b>

# 1.

## ENERGI ANGIN

### 1.1. Latar Belakang

Angin merupakan udara yang bergerak yang disebabkan oleh perbedaan tekanan udara. Perbedaan tekanan udara tersebut dipengaruhi oleh sinar matahari. Jadi angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke bertekanan udara rendah. Angin yang bertiup di permukaan bumi ini terjadi akibat adanya perbedaan penerimaan radiasi surya, sehingga mengakibatkan perbedaan suhu udara. Adanya perbedaan suhu tersebut menyebabkan perbedaan tekanan, akhirnya menimbulkan gerakan udara [1]. Ketika udara dipanasi oleh matahari, maka udara memuoi. Tekanan udara yang telah memuoi massa jenisnya menjadi lebih ringan sehingga udara naik, pada saat ini tekanan udara turun. Udara di sekitarnya mengalir ke tempat yang bertekanan rendah. Menurut hukum aerodinamika suhu atau temperatur berbanding terbalik dengan tekanan yang mana temperatur yang lebih tinggi akan memiliki tekanan yang rendah dan sebaliknya. Berkaitan dengan pernyataan bahwa angin adalah udara yang bergerak, maka hal ini menandakan bahwa angin menghasilkan energi kinetik.

Angin diklasifikasikan berdasarkan sirkulasi udara setempat

1. Angin Laut adalah angin yang bertiup dari arah laut ke arah darat yang umumnya terjadi pada siang hari dari pukul 09.00 sampai dengan pukul 16.00 di daerah pesisir pantai. Angin ini biasa dimanfaatkan para nelayan untuk pulang dari menangkap ikan di laut. Angin laut ini terjadi pada siang hari. Dikarenakan kapasitas panas yang lebih besar pada air daripada daratan, sinar matahari memanasi darat lebih cepat daripada laut.

2. Angin darat adalah angin yang bertiup dari arah darat ke arah laut yang umumnya terjadi pada saat malam hari dari jam 20.00 sampai dengan jam 06.00 di daerah pesisir pantai.
3. Angin gunung adalah angin yang bertiup dari gunung menuju lembah, yang terjadi saat sore hari / matahari mulai terbenam. Ketika sore hari (matahari mulai terbenam), gunung telah mendingin sedang lembah masih panas (dalam proses mengeluarkan panas). Sehingga suhu di lembah lebih panas dari pada suhu di gunung. Hal ini mengakibatkan, udara panas dari lembah naik dan digantikan oleh udara dingin dari gunung, sehingga terjadi aliran udara (angin) dari gunung menuju lembah.
4. Angin lembah adalah angin yang bertiup dari lembah menuju gunung, yang terjadi saat matahari terbit. Ketika matahari terbit, gunung adalah daerah yang pertama kali mendapat panas dan sepanjang hari selama proses tersebut gunung mendapat energi panas lebih banyak daripada lembah. Sehingga suhu di gunung lebih tinggi dari pada suhu di lembah gunung. Hal ini mengakibatkan, udara panas dari gunung naik dan digantikan oleh udara dingin dari lembah, sehingga terjadi aliran udara (angin) dari lembah menuju gunung.

Angin diklasifikasikan berdasarkan sirkulasi udara global:

1. Angin Pasat

Angin pasat adalah angin bertiup tetap sepanjang tahun dan daerah subtropik menuju ke daerah ekuator (khatulistiwa).

2. Angin Muson

Adalah angin yang berhembus secara periodik (minimal 3 bulan) dan antara periode yang satu dengan yang lain polanya akan berlawanan yang berganti arah secara berlawanan setiap setengah tahun.

3. Angin Fohn

Angin Fohn atau angin jatuh adalah angin yang terjadi seusai hujan Orografis. Angin yang bertiup pada suatu wilayah dengan temperatur dan kelengasan yang berbeda.

## **1.2. Potensi Energi Angin di Indonesia**

Indonesia yang memiliki pulau lebih dari 17000 dan garis pantai sepanjang 80.791,42 km, memiliki potensi energi angin yang melimpah, namun salah satu masalah terpenting dalam pengembangan energi angin adalah pengukuran kecepatan angin rata-rata sepanjang tahun. Pengukuran yang tepat terkait kecepatan angin rata-rata sepanjang tahun harus valid. Hal ini sangat penting untuk pemilihan teknologi turbin angin yang akan digunakan untuk menghasilkan listrik.

Indonesia memiliki potensi sumber daya energi angin. ESDM memperkirakan bahwa total kapasitas potensi energi angin di negara ini sekitar 9,29 GW. Namun, total kapasitas yang terpasang untuk pembangkit tenaga angin hanya 1.6MW, dan sebagian besar untuk tujuan penelitian [2].

Data angin di Indonesia diperoleh dari berbagai pengukuran angin seperti dari National Badan Meteorologi (BMKG) dan dengan pengukuran in-situ dilakukan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), Winrock International USA, Wind Guard Germany bekerja sama dengan Pemerintah Daerah), Soluziona bekerja sama dengan ESDM, NipSA\_Spain dan institusi terkait lainnya di beberapa area di Indonesia. Namun, masih ada lokasi yang belum diakses karena letaknya yang terpencil, besar jumlah lokasi yang terisolasi dan keterbatasan keuangan. Untuk lokasi-lokasi tersebut, kerja sama dengan institusi terkait dan sektor swasta diperlukan. Untuk peningkatan kualitas data, jumlah pengukuran diperluas dengan menggunakan peralatan yang lebih andal dan pengukuran langsung di lokasi pemilihan. Berdasarkan data yang dikumpulkan, sekitar 166 situs di Indonesia telah diukur untuk potensi energi angin [3].

Tabel 1.1. Ringkasan Data Angin Indonesia

Sumber Potensial	Kec Angin pada Ketinggian 50 m (m/s)	Densitas Daya Angin pada Ketinggian 50 m (W/m <sup>2</sup> )	Jumlah Titik Pengukuran	Provinsi
Marginal	3,0 - 4,0	< 75	84	Maluku, Papua, Sumba, Mentawai, Bengkulu, Jambi, Nusa Tenggara Barat dan Timur, Sulawesi Selatan dan Utara, Sumatera Utara, Jawa Tengah, DIY, Lampung dan Kalimantan
Cukup	4,0 - 5,0	75 - 150	34	Jawa Tengah, Jawa Timur, DIY, Bali, Bengkulu, Nusa Tenggara Barat dan Timur, Sulawesi Selatan dan Utara.
Baik	≥ 5,0	> 150	35	Banten, DKI, Jawa Barat dan Tengah, Nusa Tenggara Barat dan Timur, Sulawesi Selatan dan Utara, Maluku

Dan hasilnya menunjukkan bahwa 35 situs memiliki energi angin potensial yang baik, dengan rata-rata kecepatan angin tahunan di atas 6 m / s. Selain itu, sekitar 34 lokasi juga memiliki energi angin yang cukup untuk dikembangkan dengan rata-rata tahunan kecepatan angin berkisar antara 4 - 5 m / s.

Pengukuran energi angin di Indonesia telah dilakukan lebih dari 15 tahun yang lalu. Sebagian besar memang begitu dilakukan oleh LAPAN [4].

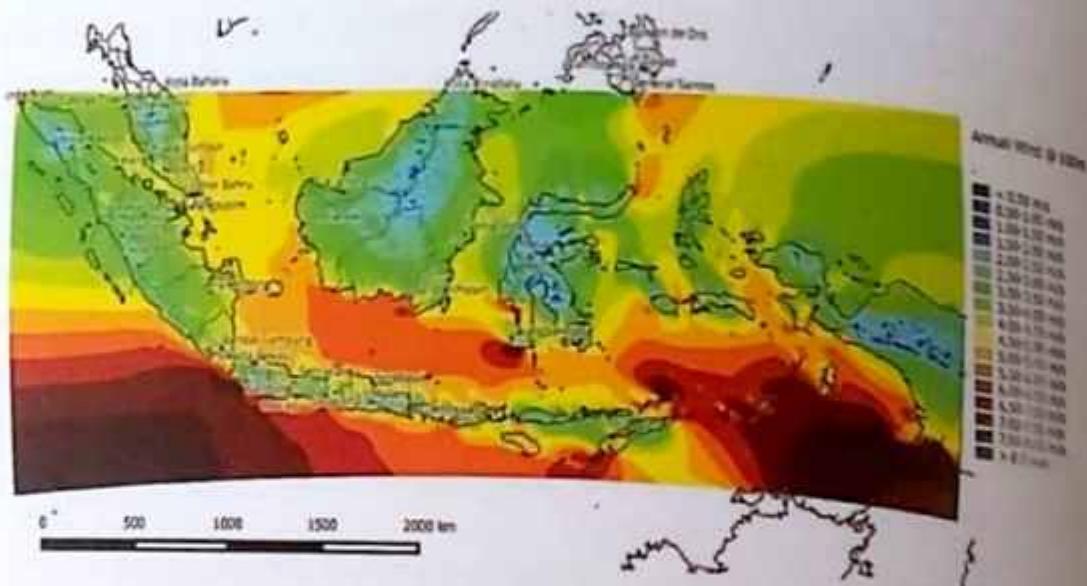
Selain pengukuran yang dilakukan oleh LAPAN, prediksi potensi energi angin di Indonesia dapat dilakukan dengan metode WRA (*Wind Resources Assessment*). Metode ini memerlukan data sekunder berupa klimatologi angin dalam skala meso dan data primer untuk skala mikro (data sekunder dari data statistika skala

rendah adalah mungkin jika data cuaca satelit sebagai data primer tidak tersedia). Data pengukuran yang disajikan pada tabel 2 berkategori mikro di mana area yang dianalisis berukuran 20 km dari titik *reference* pada 11 titik menggunakan baik data satelit maupun survei lapangan. Metode WRA di terapkan pada 7 propinsi dengan luasan cakupan sebesar 9,936.53 km<sup>2</sup> dengan menggunakan turbin angin berdiameter 55 m dengan kapasitas setara 750 kW, hasil simulasi dapat membangkitkan energi listrik sebesar 2745 GW atau setara 55184 GWh/tahun. Lokasi pengambilan data serta hasilnya ditabulasikan pada tabel 1.2 [5].

**Tabel 1.2. Ringkasan Wind Resource Assesment**

Site	$V_{ws}$ m/s	Weibul Parameter		WPD W/m <sup>2</sup>
		C(m/s)	k	
Baron DIY	5,8	6,6	2,34	202
Lebak - Banten	5,5	6,2	2,07	185
Nusa Penida - Bali	4,9	5,5	1,97	137
Oelbubuk NTT	6,7	7,8	2,33	334
Bantul DIY	4,1	4,6	1,7	99
Sukabumi West Java	6,6	7,4	2,54	272
Purworejo Central Java	5,32	5,9	1,52	250
Garut West Java *)	6,6	7,5	3,29	248
Sidrap South Sulawesi *)	7,04	7,9	2,06	395
Jeneponto South Sulawesi *)	8,11	9,3	2,73	511
Selayar South Sulawesi	4,0	4,5	1,86	83

WRA adalah salah satu program yang *performed continuously*, bersinergi dengan beberapa institusi, baik national maupun internasional untuk menghasilkan peta angin di beberapa daerah di Indonesia berdasarkan data yang tersedia lokasi yang dimonitor dan data topografi dan *information* yang tersedia, Dengan menggunakan teknik ekstrapolasi tertentu. Peta angin Indonesia *wind* segera terwujud, namun sebelum data tersebut terwujud kita dapat memetakan data angin di indonesia dengan mengandalkan hasil simulasi [6] yang diperlihatkan pada gambar 1.1.



**Gambar 1.1. Peta Angin Indonesia pada Ketinggian 100 m (Meso Scale).**

Berdasarkan penelitian terdahulu dan data satelit serta hasil simulasi dari peta angin indonesia daerah yang berpotensi untuk di instalasikan pembangkit listrik tenaga angin untuk skala medium dan besar dapat dilihat pada tabel 1.3.

**Tabel 1.3. Daerah yang Berpotensi untuk Diinstalasikan PLTA**

Site	$V_{\infty}$ m/s	Weibull Parameter		Wind Power Density $W/m^2$	Calculation Height (m)	Calculation Elevation (m)
		C(m/s)	k			
Baron, DIY	6.13	6.29	2.24	245	50	150
Lebak, Banten	5.58	6.3	2.06	198	50	150
Nusa Penida, Bali	2.73	3.1	1.66	30	20	150
Olembuk, NTT	6.1	6.9	1.6	301	30	160
Bawen, DIY	4	4.7	1.87	91	50	130
Sukabumi, West Java	6.27	7.1	2.08	272	50	150
Purworejo, Central Java	5.16	5.7	1.5	231	60	150
Garut, West Java	6.57	7.4	2.89	268	50	100
Sikap, South Sulawesi	6.43	7.3	2.05	320	50	100
Jenepeonto, South Sulawesi	7.96	9.0	2.51	491	50	100
Selayar, South Sulawesi	4.6	5.2	1.83	143	24	100

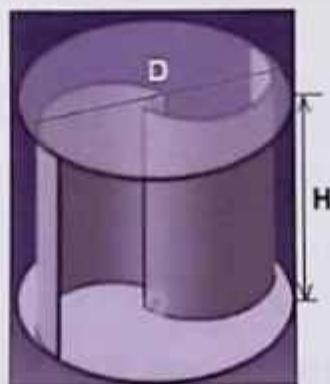
2.

## **PARAMETER UJI MODEL DAN ALAT SERTA INSTRUMEN**

## 2.1. Parameter Uji Model

Kinerja suatu model turbin angin sumbu vertikal berbasis *drag forces* dapat dianalisis dengan persamaan-persamaan berikut ini.

1. **Daya Angin** adalah laju energi kinetik udara yang menimpa permukaan model dari turbin angin.



**Gambar 2.1. Model Turbin Angin**

$$P_w = \frac{1}{2} \dot{m} V^2$$

$$\dot{m} = \rho A V$$

Di mana

Pw : Daya angin (W)

$\rho$  : Densitas udara ( $\text{kg/m}^3$ )

A = tinggi (H) x diameter turbin (D)

: Luas sapuan turbin angin ( $m^2$ )

$V$  : Kecepatan angin (m/s)

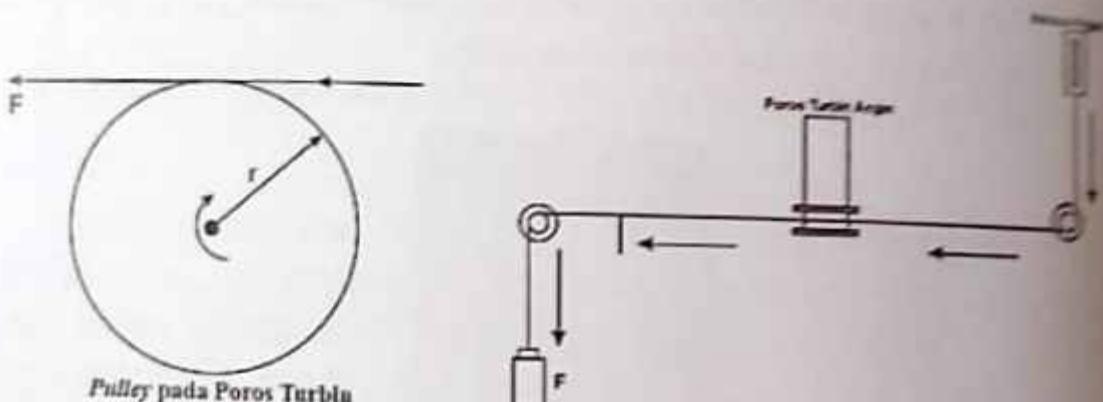
2. Daya Turbin adalah kemampuan turbin mengonversi energi kinetik angin yang dapat dihasilkan oleh yang diformulasikan sebagai berikut:

Di mana

$P_T$  : Daya turbin (W)

$\omega$  : Putaran poros turbin (rps)

T : Torsi poros (N.m) yang diperoleh dengan menggerakkan poros dengan tali yang dibebani lihat gambar 3.2



Gambar 2.2. Skema Penggereman Tali pada Poros Turbin Angin untuk Mendapatkan Torsi

3. Koefisien Kinerja Turbin Angin adalah suatu nilai yang menunjukkan efisiensi turbin angin dalam mengonversi potensi daya angin menjadi daya turbin angin yang diformulasikan sebagai berikut:

4. **Tip Speed Ratio** adalah perbandingan kecepatan di ujung bilah turbin (tip) dengan kecepatan udara yang diformulasikan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (4)$$

5. Koefisien Torsi Turbin Angin adalah suatu nilai yang menunjukkan kemampuan turbin angin menghasilkan torsi yang diformulasikan sebagai berikut:

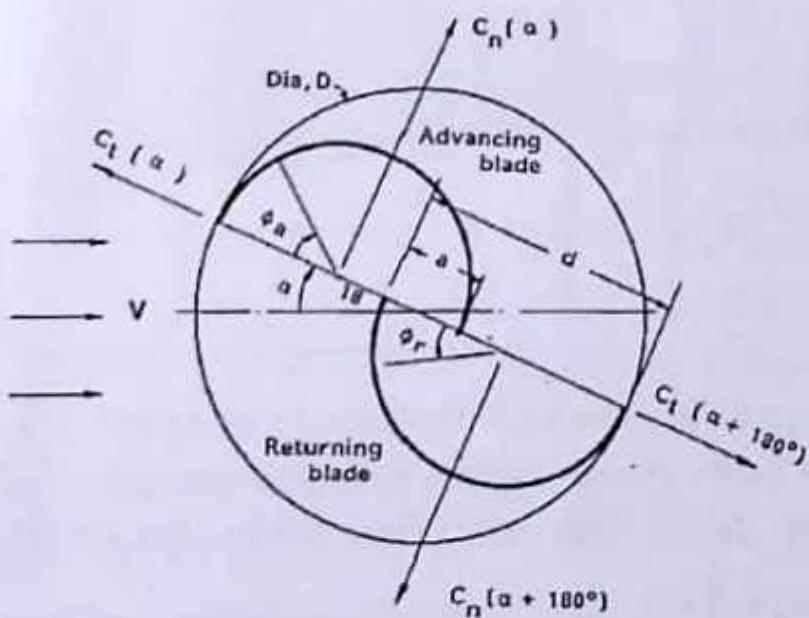
$$C_T = \frac{C_p}{\lambda}. \quad \dots \quad (5)$$

## 2.2. Karakteristik Aerodinamis Model

Selain kinerja suatu model turbin angin sumbu vertikal berbasis *drag forces* perlu juga menganalisis karakteristik aerodinamisnya yang diuraikan berdasarkan gambar 3.3 dengan persamaan-persamaan berikut ini.

1. Koefisien Tekanan adalah suatu nilai yang menunjukkan selisih tekanan statik pada permukaan bilah dengan tekanan udara yang diformulasikan sebagai berikut:

$$C_{Pr} = \frac{2(P - P_a)}{\rho V^2} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$



Gambar 2.3. Skema Gaya yang Bekerja Pada Bilah

Di mana

$C_{Pr}$  : Koefisien Tekanan

- $P$  : Tekanan statis pada bilah (Pa)  
 $P_a$  : Tekanan atmosfer (Pa)  
 $\rho$  : Densitas udara ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $V$  : Kecepatan angin (m/s)

2. Gaya yang bekerja pada bilah adalah gaya normal ( $F_n$ ) dan tangensial ( $F_t$ ) terhadap bilah. Gaya normal dan tangensial ini diperoleh dari data tekanan statis pada *pressure tap* yang ada di permukaan bilah yang diformulasikan sebagai berikut:

$$F_n = \int_0^{\pi} \Delta P \frac{d}{2} \cos \Phi d\Phi = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \frac{d}{2} \cos \Phi_i \Delta \Phi_i \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

$$F_t = \int_0^{\pi} \Delta P \frac{d}{2} \sin \Phi d\Phi = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \frac{d}{2} \sin \Phi_i \Delta \Phi_i \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

Hasil integral dari gaya normal dan tangensial di dekati dengan formulasi numerik.

3. Koefisien Drag yang bekerja pada bilah terdiri dari gaya normal dan tangensial yang diformulasikan sebagai berikut:

$$C_n = \frac{2 F_n}{\rho V^2 d} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

$$C_t = \frac{2 F_t}{\rho V^2 d} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

4. Torsi pada poros adalah efek dari perkalian gaya normal dengan jari-jari bilah yang diformulasikan sebagai berikut:

$$T = F_n * \frac{d}{2} * (1 - S) \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

Persamaan 11 dapat disederhanakan untuk mendapatkan koefisien torsi untuk satu bilah pada sudut tertentu.

$$C_q(\alpha) = C_n(\alpha) \frac{1 - S}{2 - S} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

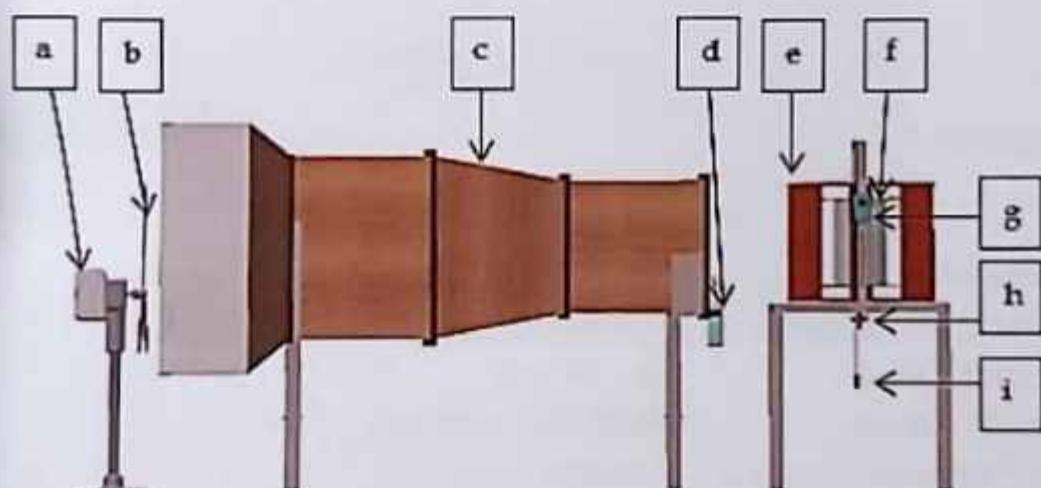
Torsi statik yang dihasilkan koefisien torsi pada rotor dapat diformulasikan sebagai berikut:

Di mana ( $C_n(\alpha)$ ) merujuk koefisien *drag advancing blade* dan  $C_n(\alpha + 180)$ .

### 2.3. Alat dan Instrumen

Selain parameter uji model diperlukan juga peralatan dan instrumen yang terkait agar parameter yang diuji dapat dianalisis adapun peralatan dan instrumen yang digunakan sebagai berikut:

#### 1. Rangkaian Terowongan angin

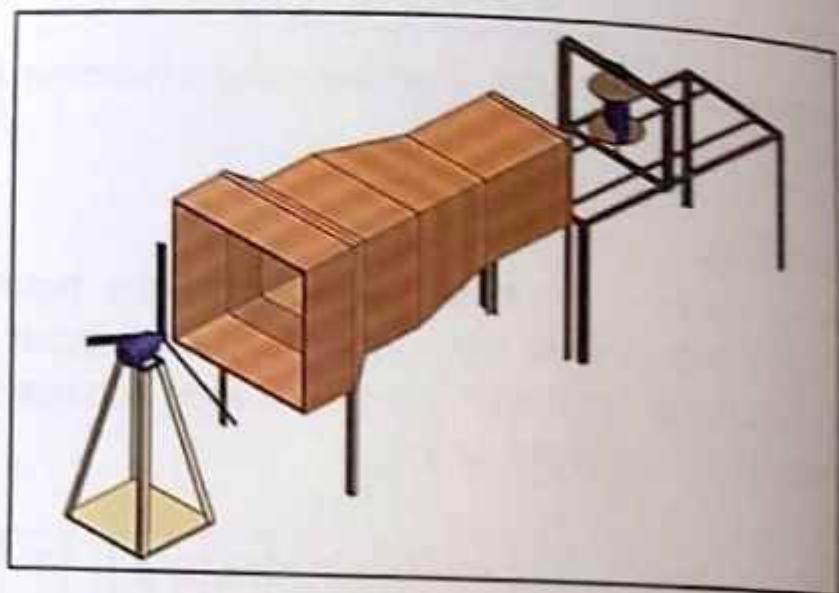


**Gambar 2.4. Rangkaian Penelitian Terowongan Angin Tampak Samping**

Keterangan:

- a. Inverter
  - b. Kipas
  - c. Terowongan
  - d. Anemometer
  - e. Deflektor
  - f. *Swirling Savonius*

- g. Neraca
- h. Puly
- i. Beban



**Gambar 2.5. Rangkaian Penelitian Terowongan Angin Tampak Isometri**

Spesifikasi:

Lubang Masuk	:	65 x 65 cm
Lubang Keluar	:	50 x 50 cm
Luasan Keluar	:	2025 cm <sup>2</sup>
Kisi Pemecah Angin	:	Tersedia

## 2. *Tachometer*

*Tachometer* adalah sebuah alat pengujian yang dirancang untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek seperti mengukur putaran per menit (RPM) dari poros turbin.

Spesifikasi:

Measurement & Range	:	Photo Tachometer: 10 to 99,999 rpm.
Contact Tachometer	:	0.5 to 19,999 RPM.
Resolution	:	0.1 RPM (< 1,000 RPM). 1 RPM (1,000 RPM).
Accuracy	:	± (0.05% + 1 digit), RPM only.



**Gambar 2.6. Tachometer**

3. Kipas



**Gambar 2.7. Kipas**

Spesifikasi:

Size	: 26" (inch)
Power Input	: 142–187 W
Rotation Speed (RPM)	: up to 1400

4. Anemometer

Anemometer adalah sebuah alat ukur yang digunakan untuk mengukur atau menentukan kecepatan angin.



**Gambar 2.8. Anemometer**

Spesifikasi:

Air Velocity : m/s (meter per second)  
Range : 0.6–30.00  
Resolution : 0.01  
Basic Accuracy :  $\pm 3\% \pm 0.20$  m/s

## 5. Neraca Digital

Alat Ukur yang di gunakan untuk mengukur beban Turbin Angin  
Spesifikasi:

Kapasitas Total : 5 Kg/5000 gr



**Gambar 2.9. Neraca Digital**

6. Beban Anak Timbangan



Gambar 2.10. Anak Timbang

7. Manometer

Manometer berfungsi untuk mengetahui tekanan Angin yang Menabrak bilah turbin

Spesifikasi:

Fluida : minyak diberi pewarna

Sudut :  $15^{\circ}$

Bahan Selang : Plastik



Gambar 2.11. Manometer

8. Thermo-Hygrometer Digital



Gambar 2.12. Thermo-Hygrometer Digital

Spesifikasi sebagai berikut:

Model	: HANNA HI 9565 Thermo-Hygrometer
Rentang suhu	: 0 s.d 60° C
Rentang Dew Point	: -20 s.d 60° C
Rentang RH	: 20.0 to 95.0%
Resolusi	: 0.1% RH
Baterai	: 1x 9 V

9. Inverter Kendali Kipas.



Gambar 2.13. Inverter

Spesifikasi sebagai berikut:

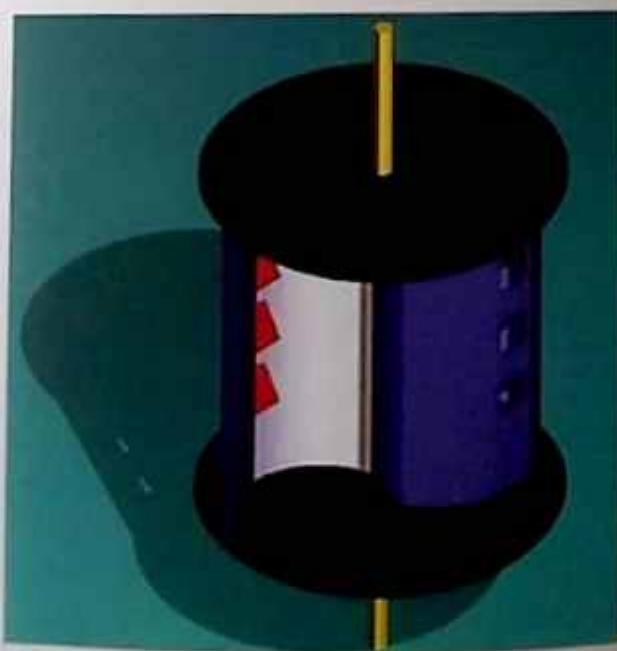
Model : CT-2002ES-A75  
Kw/Hp : 0,75KW/1HP  
Input : 220V 50/60HZ  
Rated Current : 4.2A  
Lot No : 700598-006

### 3.

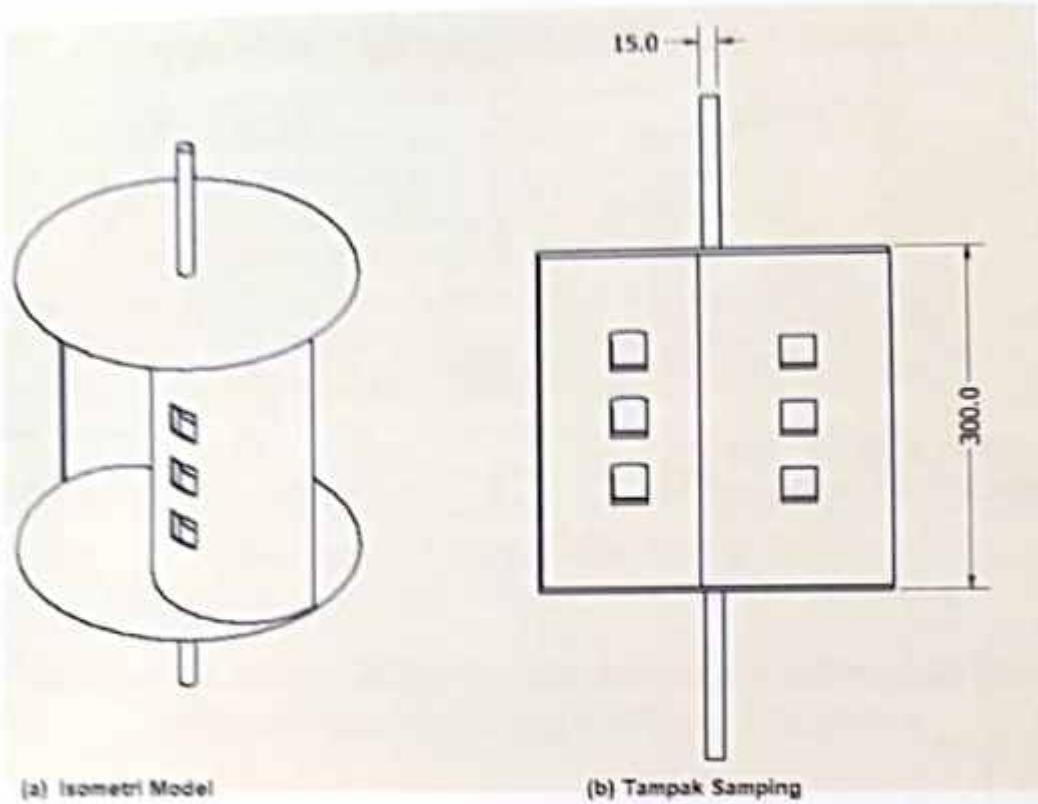
## MODEL TURBIN ANGIN BERBASIS DRAG FORCES DENGAN CELAH DI BILAH

### 3.1. Celah pada Bilah dengan Bukaan Sudut Tertentu

Pengembangan model turbin angin yang dikembangkan oleh penulis adalah memberikan celah pada bilah seperti yang dilakukan oleh Plourde, dkk. (2011) dengan geometris celah pada model berbeda dengan yang telah dilakukan oleh Plourde, dkk. (2011). Penulis mendesain celah pada model turbin angin sumbu vertikal berbasis *drag forces* plat berbentuk bujur sangkar dengan engsel bergerak bebas pada bagian atas dengan dimensi diuraikan pada tabel 3.1. Celah ini dinamakan *fix drag reducer* dinamai demikian karena bukaannya tetap pada sudut tertentu dan bertujuan mengurangi *drag* yang terjadi pada sisi cembung.

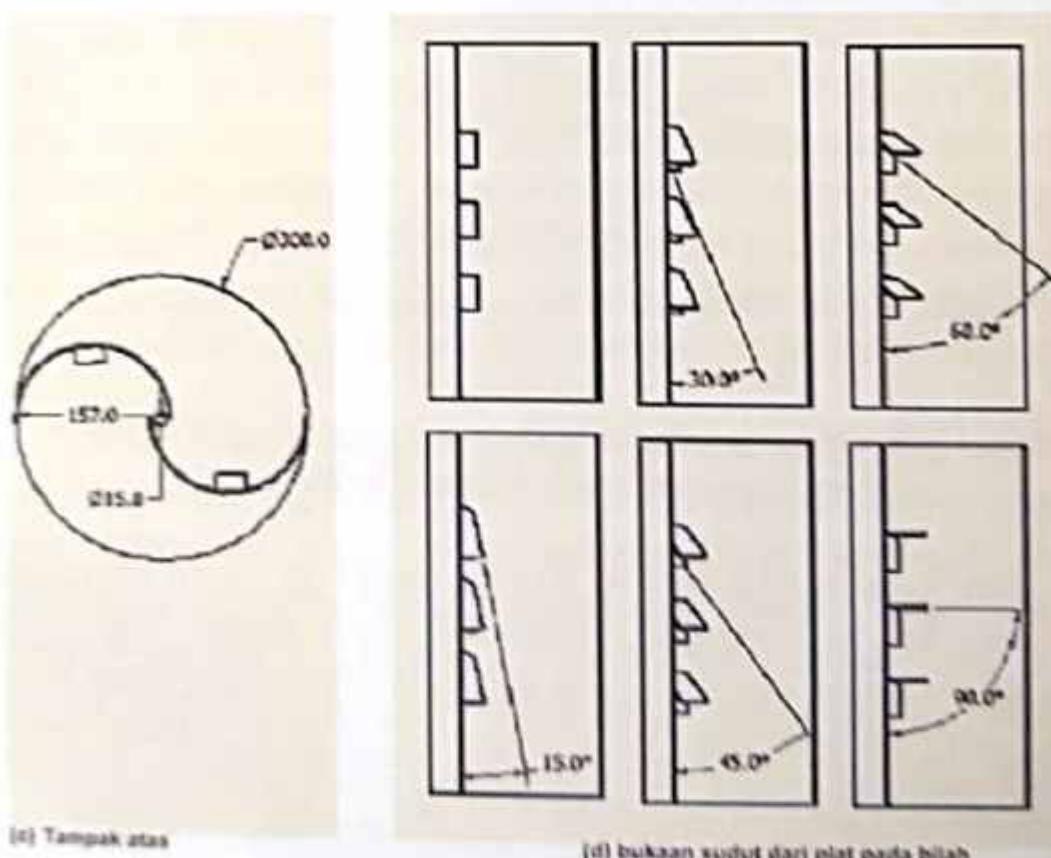


Gambar 3.1. Desain Model dengan Bilah Bercelah



(a) Isometri Model

(b) Tampak Samping



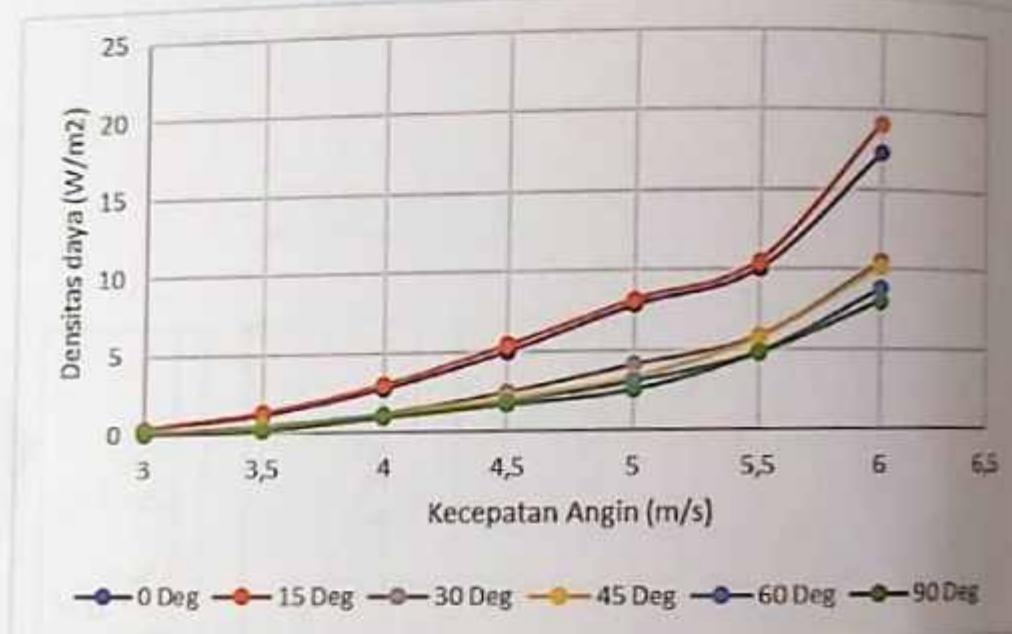
(c) Tampak atas

(d) bukaan sudut dari plat pada bilah

Gambar 3.2. Parameter Geometris dan Pandangan dari Mod

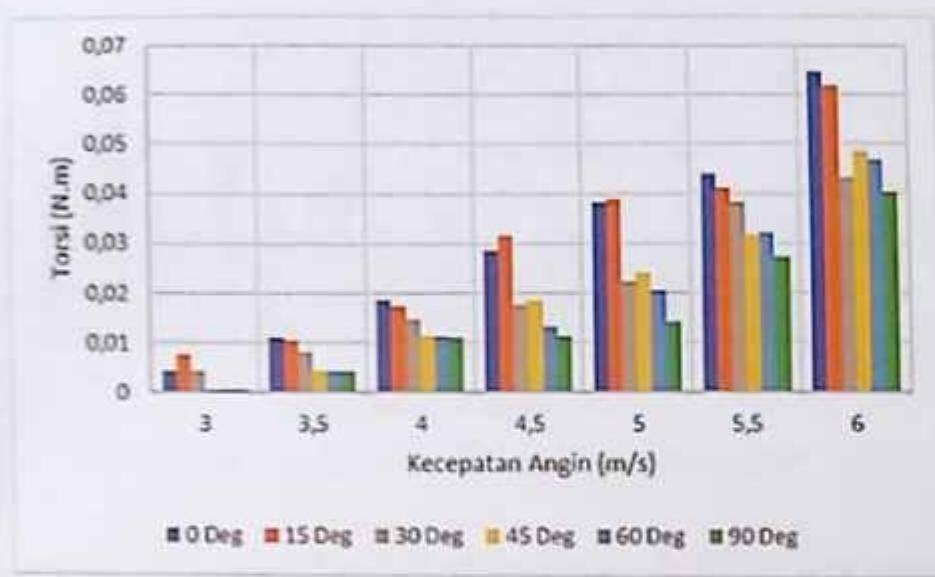
Tabel 3.1. Spesifikasi Model Uji Turbin Angin

Parameter	Bentuk / Nilai
Profil bilah	C
Jumlah bilah	2
Panjang busur, (mm)	157
Diameter rotor, (mm)	300
Jumlah fix drag reducer	3 per bilah
Dimensi fix drag reducer ( $\text{mm}^2$ )	30 x 30
Bahan bilah	Plat seng
Bahan disk atas dan bawah	Arclrylic
Bukaan sudut fix drag reducer	0°, 15°, 30°, 45°, 60° dan 90°



Gambar 3.3. Densitas Daya Maksimum dari Sudut Bukaan Fix Drag Reducer pada Model Turbin Angin

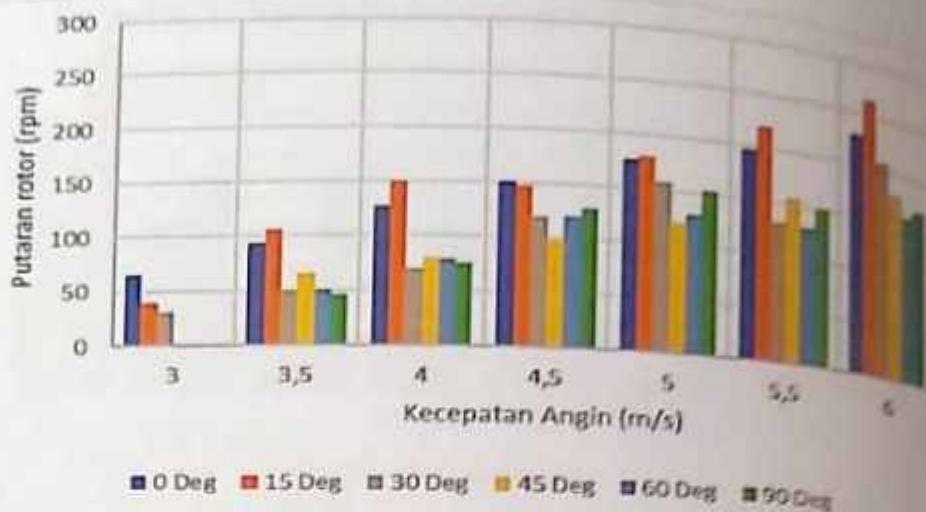
Dari gambar 3.3 terlihat kinerja model uji turbin angin yang diberikan *fix drag reducer* pada bilah memberikan efek negatif berupa penurunan densitas daya yang dihasilkan oleh bilah, kecuali pada sudut bukaan kecil yaitu sudut 15°. Hal ini diduga dengan bukaan sudut kecil dari *fix drag reducer* mampu mengurangi *drag* pada *returning blade*, namun selain itu gaya dorong yang diharapkan pada sisi *advancing blade* berkurang dikarenakan ada sedikit celah yang dihasilkan pada posisi sudut 15°.



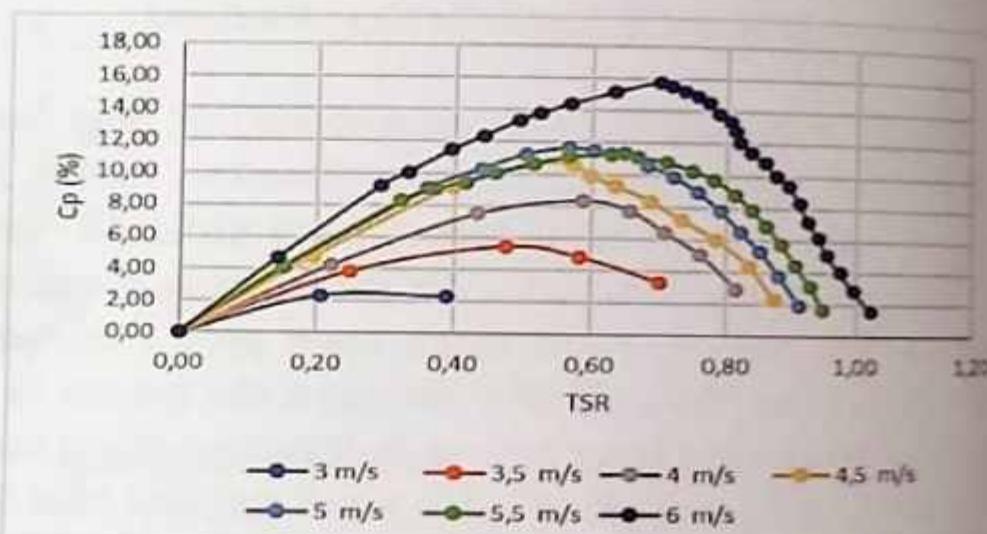
**Gambar 3.4. Torsi Model Turbin Angin pada  $C_p \max$  pada Variasi Sudut Bukaan Fix Drag Reducer**

Sehingga secara keseluruhan penambahan *fix drag reducer* pada bilah tidak menambah torsi yang dihasilkan terlihat pada gambar 3.4 besar torsi yang dihasilkan pada sudut  $15^\circ$  dan  $0^\circ$  berbeda tidak cukup signifikan, pada kecepatan angin di bawah 5,5 m/s torsi yang dihasilkan model tanpa celah pada bilahnya ( $0^\circ$ ) cenderung lebih besar daripada bilah dengan sudut bukaan *fix drag reducer*  $15^\circ$ . Namun sebaliknya torsi yang dihasilkan model dengan sudut bukaan *fix drag reducer*  $15^\circ$  lebih besar daripada bilah tanpa celah.

Namun pada bukaan sudut  $15^\circ$  menghasilkan efek jet dibelakang bilah sehingga membantu mendorong *returning blade* searah dorongan angin di *advancing blade* sehingga secara keseluruhan hal ini mampu meningkatkan putaran model uji turbin angin lihat gambar 3.5. Begitupula sebaliknya semakin besar bukan sudut *fix drag reducer* selain mengurangi *drag* pada sisi *returning blade* juga mereduksi gaya dorong pada sisi *advancing blade*, hal ini dikarenakan celah pada sisi itu semakin besar. Gambar 3.6 memperlihatkan munculnya efek jet pada bukaan sudut  $15^\circ$  di kecepatan angin 6 m/s ditandai dengan  $TSR > 1$  dan distribusi koefisien daya terlihat signifikan daripada bukaan sudut yang lain.

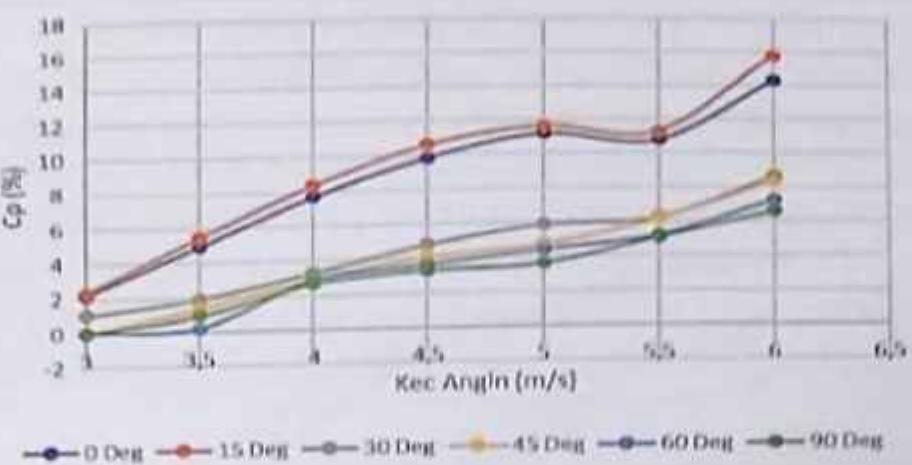


Gambar 3.5. Putaran Model Turbin Angin pada  $C_p \text{ max}$  pada Variasi Sudut Bukaan Fix Drag Reducer



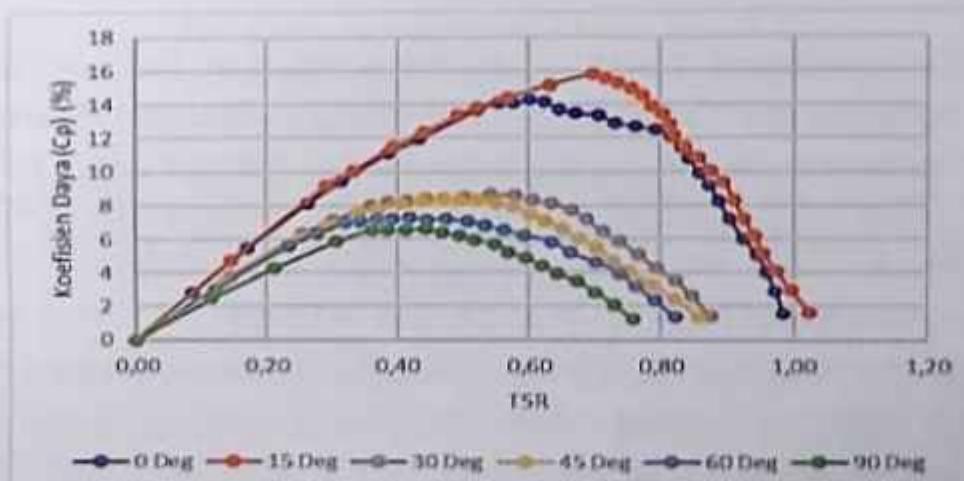
Gambar 3.6. Pengaruh Kecepatan Angin terhadap Koefisien Daya Model Turbin Angin Pada Bukaan Sudut 15 deg

Seiring kenaikan bukaan sudut maka gaya dorong yang dihasilkan turun, di mana secara keseluruhan semakin bertambahnya bukaan sudut fix drag reducer mengakibatkan kinerja model uji turbin angin semakin berkurang dapat dilihat pada densitas daya yang dihasilkan semakin menurun lihat gambar 3.3 dan Koefisien kinerja model turbin angin lihat gambar 3.7 di semua variasi kecepatan yang diujikan.



**Gambar 3.7.  $C_p$  max Model Turbin Angin dengan Variasi Sudut Bukaan Fix Drag Reducer dan Kecepatan Angin yang Diujikan**

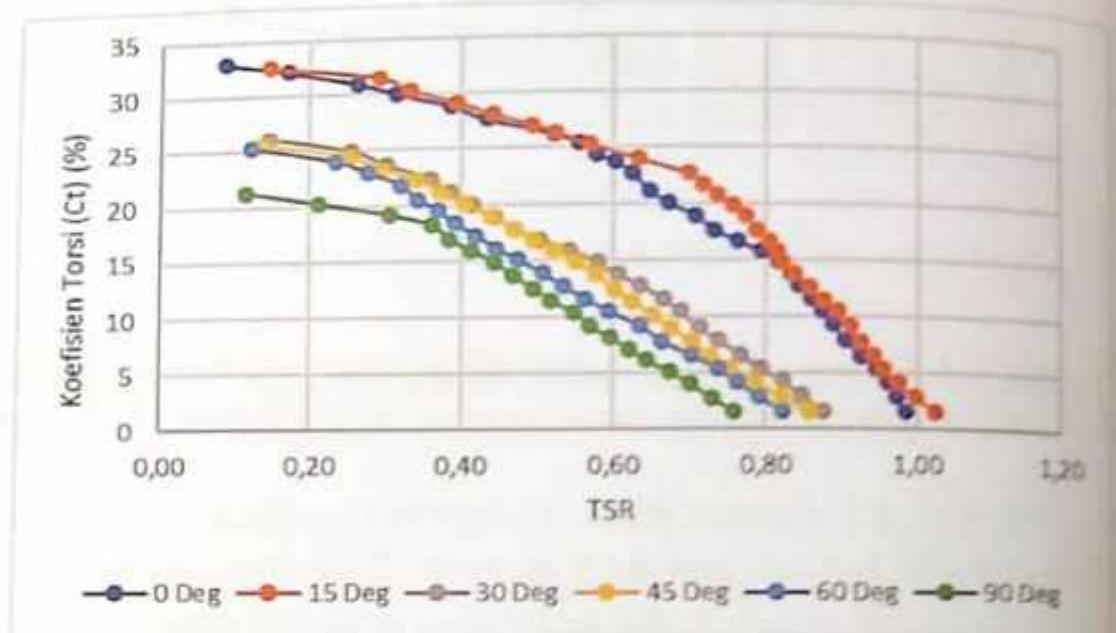
Gambar 3.8 memperlihatkan distribusi koefisien daya pada berbagai sudut bukaan dari fix drag reducer, terlihat bahwa hanya bukaan sudut  $15^\circ$  atau bukaan sudut yang kecil dan nilai TSR > 0,6 memperlihatkan koefisien daya yang lebih besar daripada bilah model uji turbin angin tanpa sudut bukaan fix drag reducer ( $0^\circ$ ).



**Gambar 3.8. Distribusi Koefisien Daya Model Turbin Angin dengan Variasi Tip Speed Ratio pada Kecepatan Angin 6 m/s**

Distribusi koefisien torsi model uji turbin angin yang diperlihatkan pada gambar 3.9 menunjukkan penambahan celah

pada bilah model uji turbin angin dengan sudut tertentu mengurangi kemampuan model uji turbin angin melakukan *self starting* yang ditandai nilai torsinya lebih kecil pada *tip speed ratio* yang lebih besar.



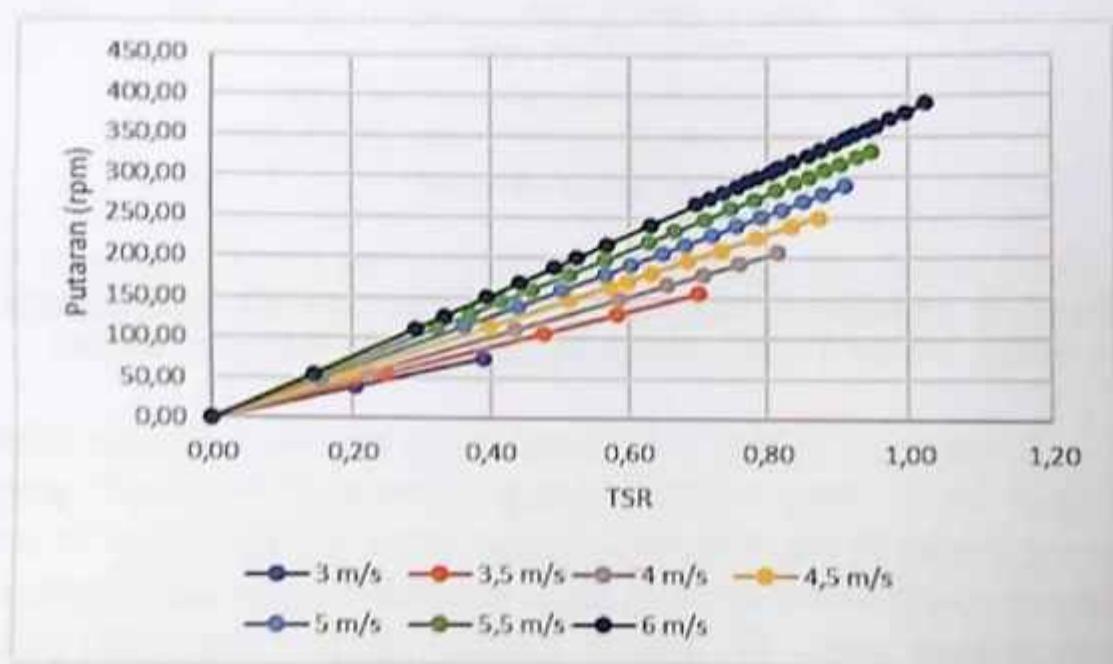
Gambar 3.9. Distribusi Koefisien Torsi Model Turbin Angin dengan Variasi *Tip Speed Ratio* pada Kecepatan Angin 6 m/s

### 3.2. Perbandingan Celah pada Bilah dengan Bukaan Sudut Tertentu dan Celah pada Bilah dengan Berayun Bebas

Perbandingan celah pada bilah dengan bukaan sudut  $15^\circ$  dan celah pada bilah dengan berayun bebas dimulai dari tinjauan kemampuan bilah menyerap energi angin yang ditandai dengan kemampuan turbin berputar lihat gambar 3.10 dan 3.11. Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa model turbin angin dengan celah berayun bebas lebih mampu menyerap energi angin yang menimpas bilah hal ini ditandai dengan putaran yang dihasilkan lebih besar daripada turbin bercelah dengan bukaan sudut  $15^\circ$ .

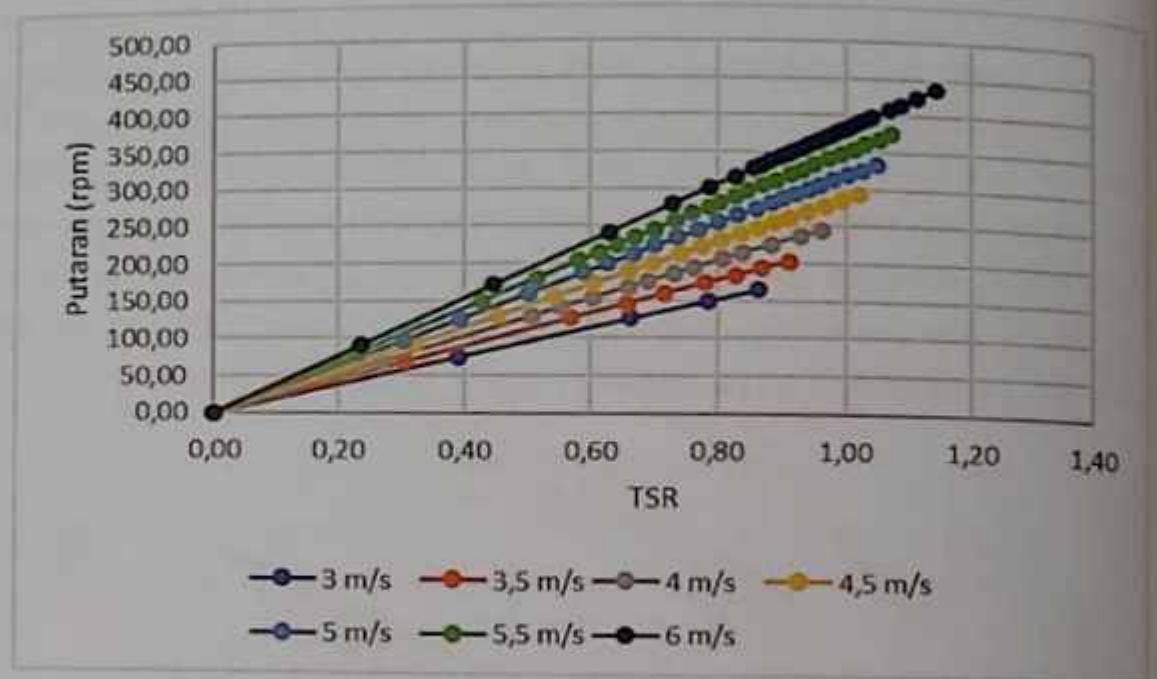
Hal ini diduga dengan celah yang berayun bebas di mana posisi plat sebagai celah yang berayun bebas didesain pada saat berputar cenderung menutup pada sisi bilah cekung dan membuka pada sisi bilah cembung, sehingga hal ini menyebabkan gaya dorong positif di sisi bilah cekung tidak berkurang secara signifikan

dengan kondisi bilah tanpa celah sedangkan di sisi bilah cembung adanya celah menyebabkan gaya dorong negatif di sisi cembung berkurang oleh karena itu secara keseluruhan gaya dorong positif yang ditimbulkan lebih besar yang pada akhirnya mendorong bilah lebih kuat yang ditandai dengan bertambahnya putaran. Sebaliknya pada bilah dengan bukaan sudut tertentu baik di sisi cekung maupun di sisi cembung berpengaruh terhadap gaya dorong positif pada sisi cekung dan gaya dorong negatif pada sisi cembung.



**Gambar 3.10. Profil Putaran Turbin Terhadap *Tip Speed Ratio* untuk Model Turbin Angin dengan Celah pada Bilah Bukaan Sudut  $15^{\circ}$**

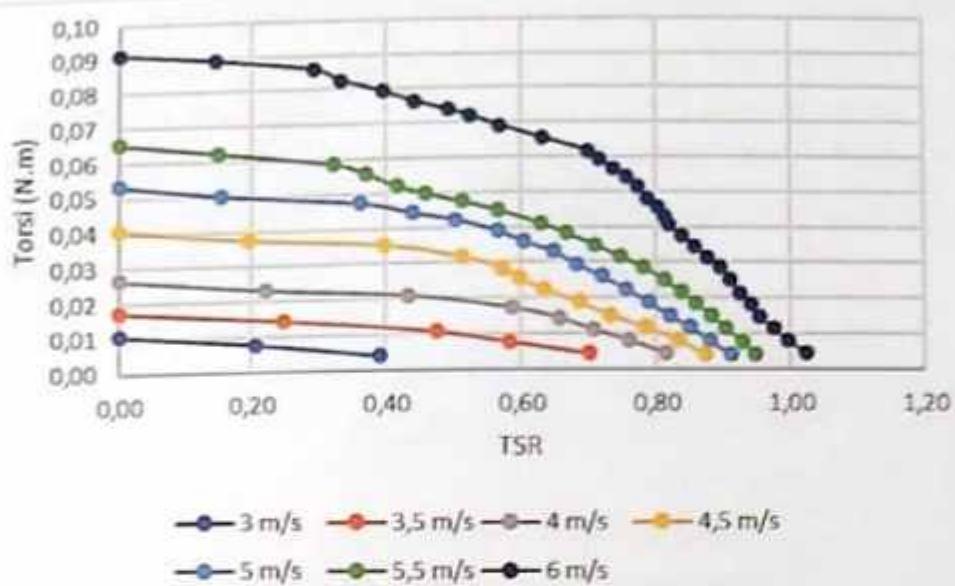
Torsi adalah parameter yang terkait dengan gaya dorong yang terjadi pada sisi bilah cekung dan cembung sehingga semakin besar selisih dari gaya dorong positif yang timbul di sisi bilah cekung dengan gaya negatif yang timbul di sisi bilah cembung.



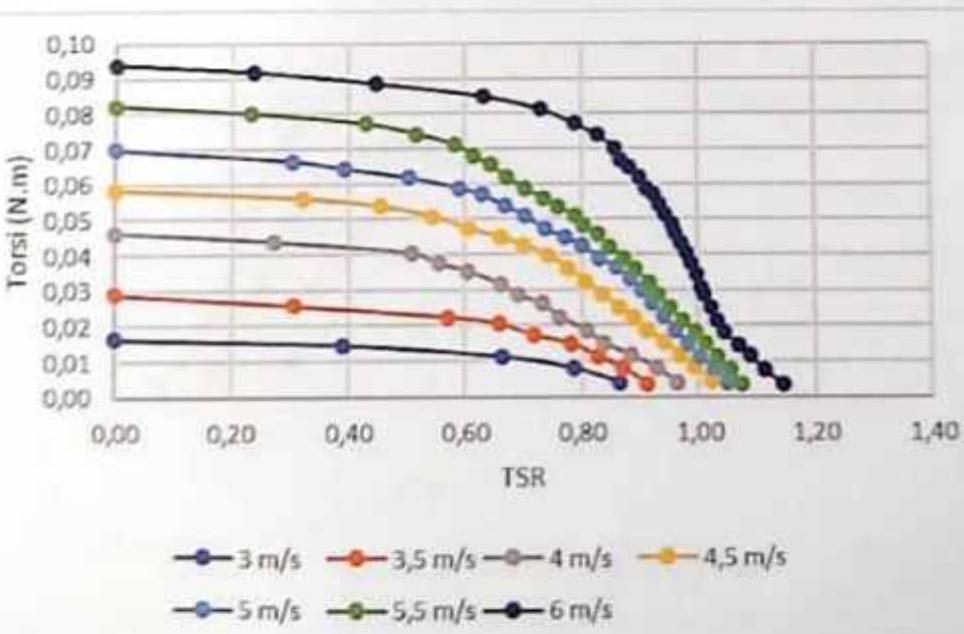
**Gambar 3.11. Profil Putaran Turbin Terhadap *Tip Speed Ratio* untuk Model Turbin Angin dengan Cela Berayun Bebas**

Gambar 3.12 dan 3.13 mendukung argumen adanya bilah dengan celah yang berayun bebas menimbulkan selisih gaya dorong positif di sisi bilah cekung dan gaya dorong negatif di sisi bilah cembung semakin besar daripada bilah dengan celah terbuka pada bukaan sudut  $15^{\circ}$ . Hal ini ditandai dengan torsi statik yaitu nilai torsi pada kondisi berhenti pada bilah dengan celah yang berayun bebas lebih besar dari pada celah terbuka dengan bukaan sudut  $15^{\circ}$  pada setiap kecepatan angin yang diujikan.

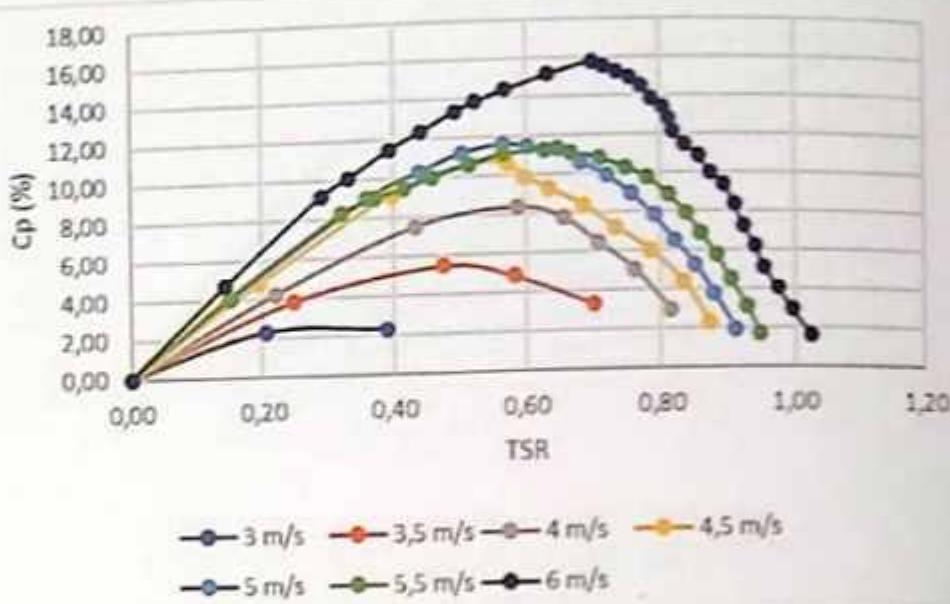
Koefisien daya turbin angin seperti pada gambar 3.13 dan 3.14 menunjukkan bahwa penambahan celah pada bilah baik dengan sudut bukaan  $15^{\circ}$  maupun berayun bebas bertambah besar seiring bertambahnya kecepatan angin dan mendorong nilai maksimum dari koefisien daya pada nilai *tip speed ratio* yang lebih besar pada kecepatan angin yang lebih tinggi.



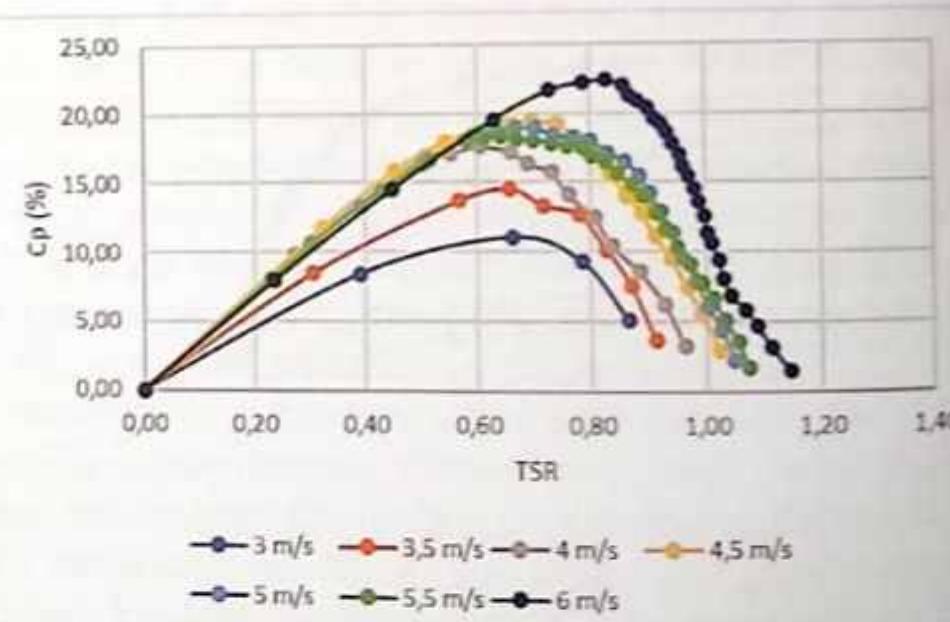
Gambar 3.12. Profil Torsi Turbin terhadap *Tip Speed Ratio* untuk Model Turbin Angin dengan Cela pada Bilah Bukaan Sudut  $15^{\circ}$



Gambar 3.13. Profil Torsi Turbin Terhadap *Tip Speed Ratio* untuk Model Turbin Angin dengan Cela Berayun Bebas

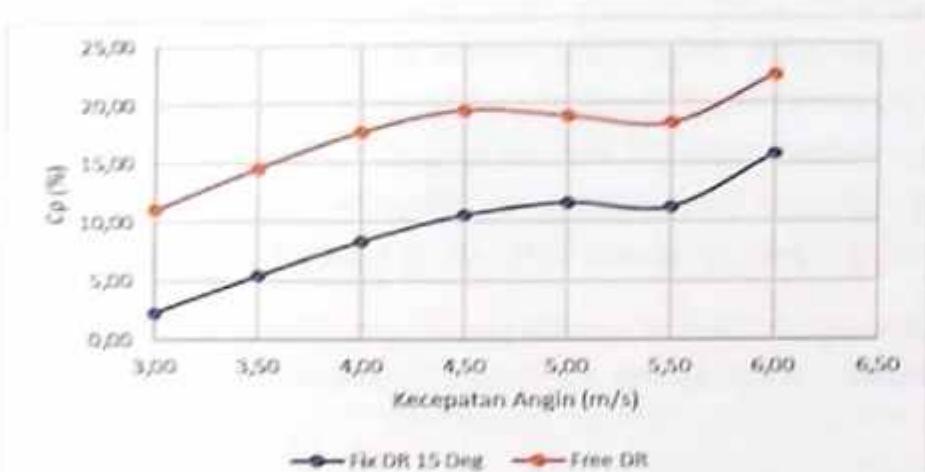


Gambar 3.14. Profil Koefisien Daya Turbin Angin terhadap Tip Speed Ratio untuk Model Turbin Angin dengan Cela pada Bilah Bukaan Sudut  $15^{\circ}$

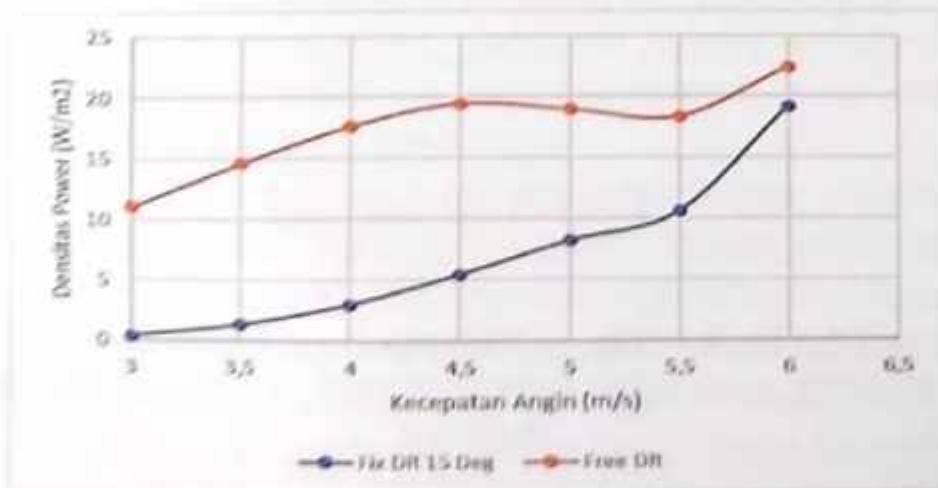


Gambar 3.15. Profil Koefisien Daya Turbin Angin terhadap Tip Speed Ratio untuk Model Turbin Angin dengan Cela pada Bilah Berayun Bebas

Kinerja dari turbin angin berbasis *drag forces* terlihat berbeda ketika bilahnya diberikan celah dengan sudut bukaan  $15^{\circ}$  dengan celah yang berayun bebas, di mana bilah yang diberikan celah yang berayun bebas memperlihatkan kinerja yang lebih baik secara signifikan daripada bilah yang diberi celah dengan bukaan sudut  $15^{\circ}$  (lihat gambar 3.14 dan 3.15).

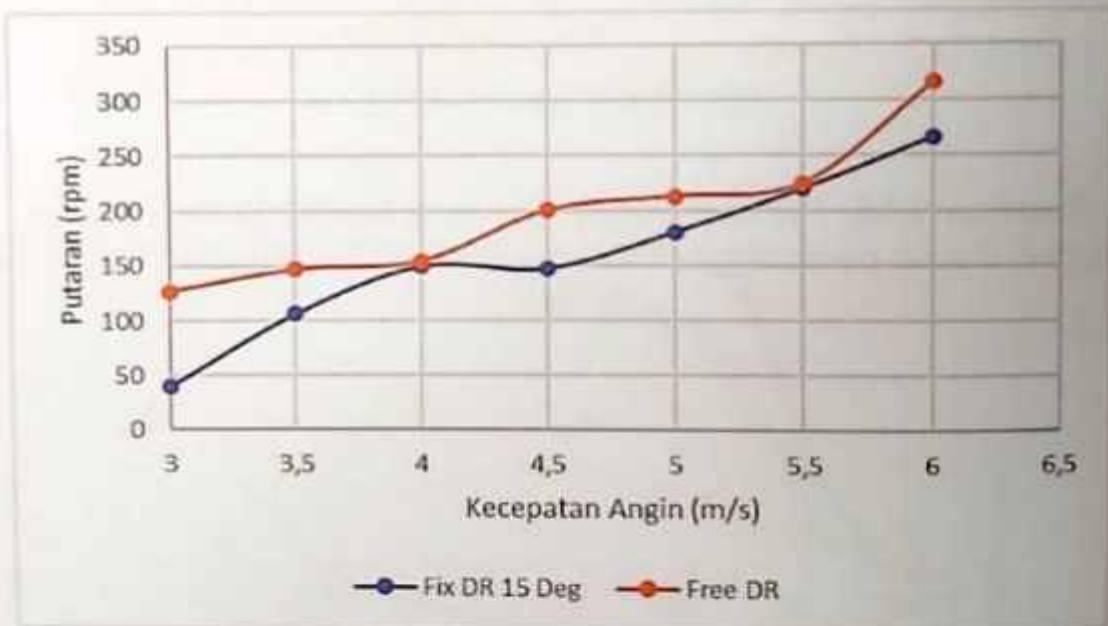


Gambar 3.16. Perbandingan  $C_p$  max Model Turbin Angin dengan Celah pada Bilah Bukaan Sudut  $15^{\circ}$  dengan Plat Bebas Berayun

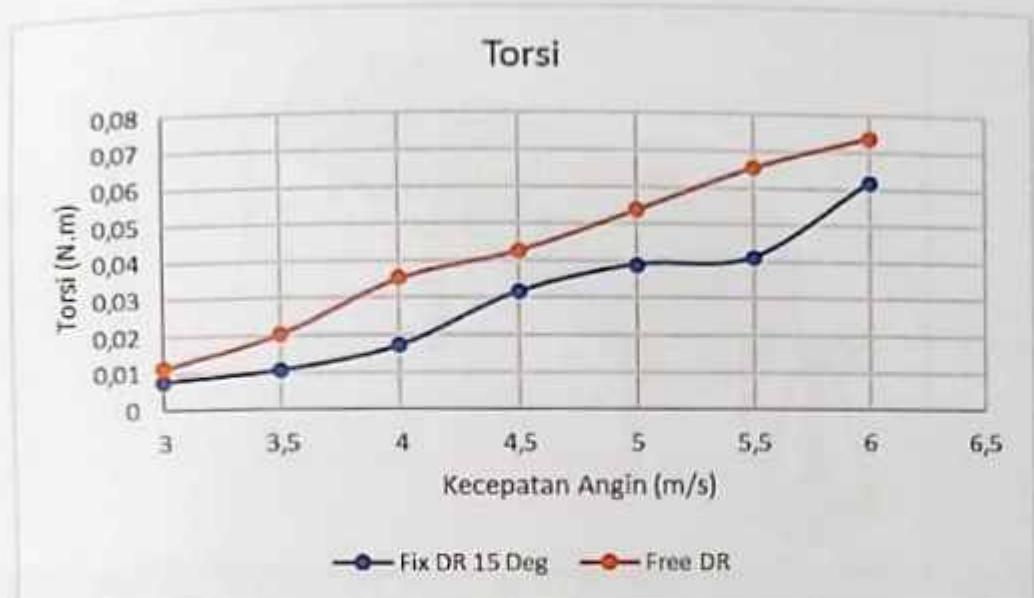


Gambar 3.17. Perbandingan Densitas Daya Model Turbin Angin dengan Celah pada Bilah Bukaan Sudut  $15^{\circ}$  dengan Plat Bebas Berayun

Putaran model turbin angin berbasis *drag forces* dengan celah pada bilah berayun bebas pada kondisi koefisien kinerja *max* ( $C_p \text{ }_{\text{max}}$ ) lebih tinggi daripada bilahnya diberikan celah dengan sudut bukaan  $15^{\circ}$ , namun untuk kecepatan angin 4 dan 5,5 m/s relatif sama (lihat gambar 3.18). Namun torsi yang dihasilkan kedua kondisi ini berbeda signifikan kecuali pada kecepatan angin rendah (lihat gambar 3.18). Kedua hal inilah yang menyebabkan profil  $C_p \text{ }_{\text{max}}$  dan densitas daya tidak sama (lihat gambar 3.18 dan 3.19). Selain itu turbin angin berbasis *drag forces* dengan celah pada bilah berayun bebas memiliki *self starting* yang lebih baik daripada celah dengan bukaan sudut tetap  $15^{\circ}$  ditandai dengan nilai torsi yang lebih tinggi pada *tip speed ratio* yang rendah (lihat gambar 3.1 dan 3.19)



**Gambar 3.18. Perbandingan Putaran Daya Model Turbin Angin dengan Cela pada Bilah Bukaan Sudut  $15^{\circ}$  dengan Plat Bebas Berayun**

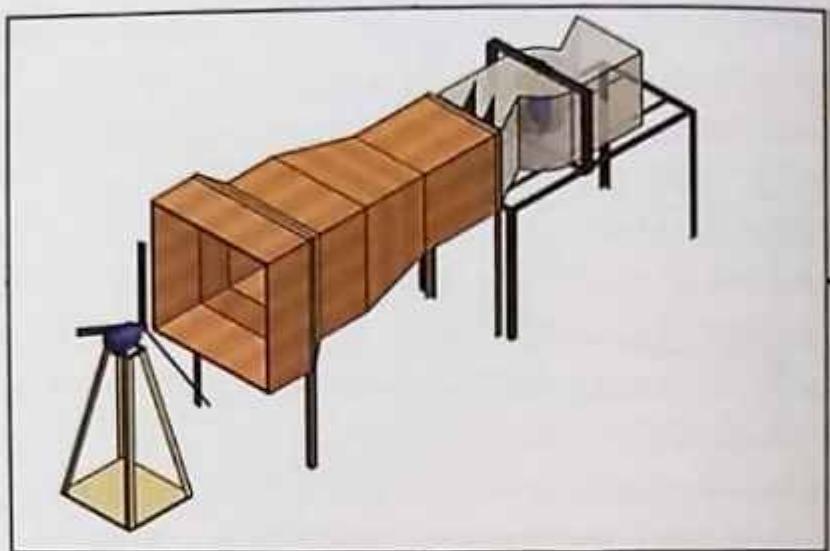


**Gambar 3.19. Perbandingan Torsi Model Turbin Angin dengan Cela pada Bilah Bukaan Sudut  $15^{\circ}$  dengan Plat Bebas Berayun**

### 3.3. Efek Penambahan Pengarah Angin Tipe *Pluit Box* terhadap Kinerja Bilah dengan Plat Berayun Bebas

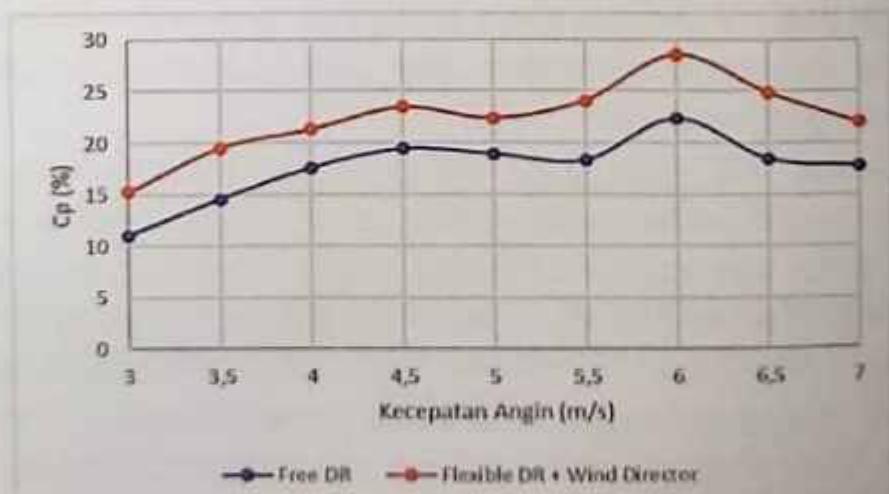
Kinerja model turbin angin sangat dipengaruhi jumlah massa dan kecepatan angin yang menimpa bilah selain memperkecil torsi negatif yang dihasilkan oleh bilah pada sisi cembung. Untuk itu pada sub bab ini menguraikan pengaruh penambahan pengarah angin tipe tertutup dengan dua bilah pengarah di ujung pengarah angin (lihat gambar 3.20).

Gambar 3.21 dan 3.22 menunjukkan bahwa penambahan pengarah angin pada model turbin angin dengan celah berayun bebas mampu meningkatkan kinerja turbin untuk semua kecepatan angin yang diujikan. Hal ini di duga adanya pengarah angin masa udara yang menimpa permukaan bilah lebih terkonsentrasi pada bilah sisi cekung sehingga torsi positif yang dihasilkan meningkat daripada bilah dengan celah berayun bebas tanpa pengarah angin ditandai dengan torsi statik yang dihasilkan model turbin angin dengan celah berayun bebas dengan pengarah angin lebih besar daripada model turbin angin dengan celah berayun bebas tanpa pengarah angin (lihat gambar 3.22).

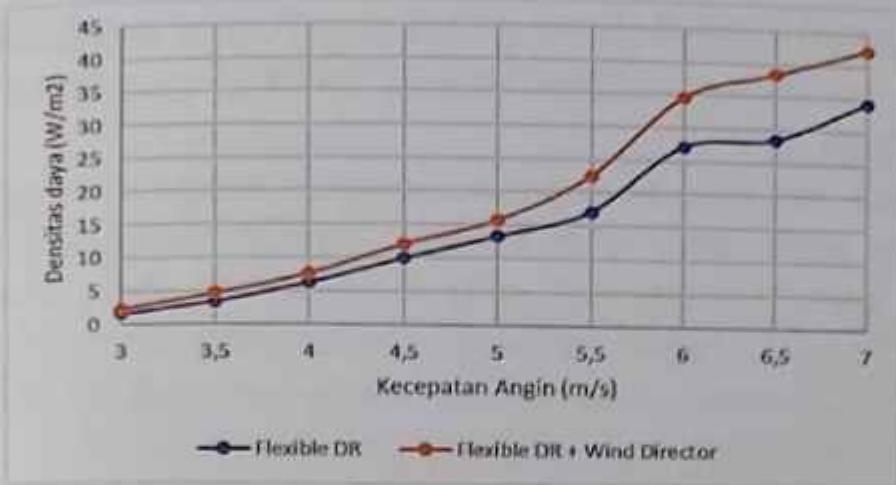


**Gambar 3.20. Instalasi Model Turbin Angin dengan Pengarah Angin Tipe *Pluit Box* dengan Dua Bilah Pengarah di Ujung Masuk**

Selain itu pengarah angin dengan adanya dua sekat pada bagian entri dari pengarah angin selain mempercepat dan mengonsentrasi udara juga memblok angin yang akan menimpa sisi cembung dari bilah, kombinasi dari fenomena ini mampu meningkatkan kinerja model turbin angin.

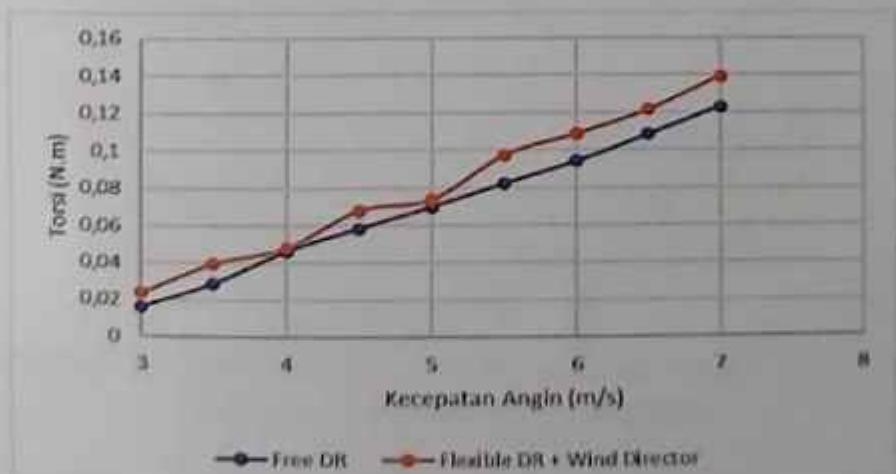


**Gambar 3.21. Perbandingan Cp max Model Turbin Angin dengan Cela Berayun Bebas tanpa dan dengan Pengarah Angin**



Gambar 3.22. Densitas Daya dari Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas tanpa dan dengan Pengarah Angin

Namun titik puncak kinerja model turbin angin dengan celah berayun bebas baik dengan dan tanpa pengarah angin mulai menurun jika kecepatan angin di atas 6 m/s. Hal ini diduga semakin meningkatnya kecepatan angin, maka akan terjadi *blockage* pada sisi masuk pengarah angin dan lapis batas yang terbentuk akibat gaya geser pada permukaan bilah mengganggu aliran udara sebelum menimpa bilah sehingga gaya yang timbul pada kondisi ini lebih rendah akibatnya kinerja dari model turbin juga menurun lihat gambar 3.21.

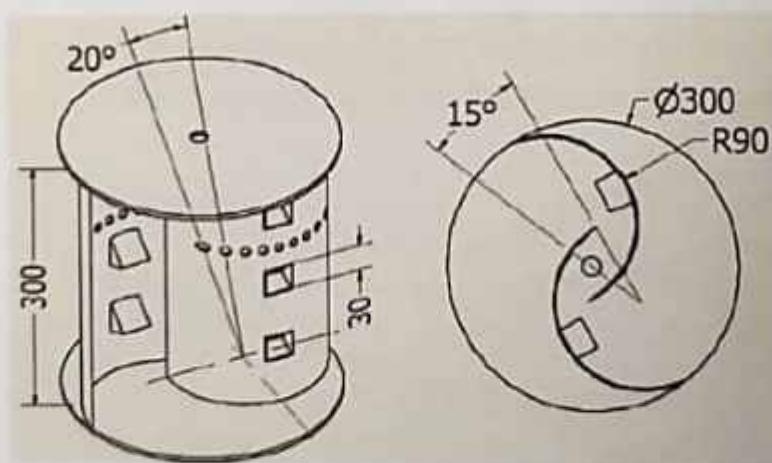


Gambar 3.23. Torsi Statik dari Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas Tanpa dan dengan Pengarah Angin

### 3.4. Efek Penambahan Pengarah Angin Jenis *Omnidirectional Guide Vanes* terhadap Kinerja Bilah dengan Plat Berayun Bebas

Pada sub bab sebelumnya dijelaskan pengaruh penambahan pengarah angin jenis pluit terhadap kinerja model turbin angin dengan bilah terdapat plat yang berengsel di atasnya sehingga mampu berayun bebas akibatnya celah yang ditutupi oleh plat tersebut dapat terbuka dan tertutup seiring kombinasi gerak berputar model turbin dengan angin yang menimpa permukaan bilah.

Pada sub bab ini model turbin angin dengan plat berayun bebas memiliki desain dan bahan yang berbeda. Adapun model turbin angin dengan plat berayun bebas dapat dilihat pada gambar 3.24 di mana pada permukaan dibuatkan lubang untuk mengukur tekanan statik yang bekerja baik pada sisi depan maupun belakang bilah model turbin lubang ini disebut *pressure tap*. Adapun jumlah *pressure tap* pada bilah sebanyak 36 titik dengan setiap titik berjarak  $20^{\circ}$ . Untuk spesifikasi model turbin yang dikembangkan dapat dilihat pada tabel 3.2.

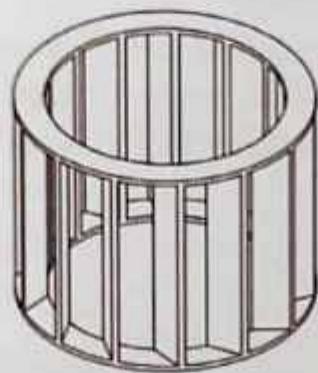


Gambar 3.24. Dimensi dan Parameter dari Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas

Selain itu juga didesain pengarah angin jenis selubung yang mengitari model turbin angin dengan variasi bilah 12, 14, 16 dan 18 dan sudut pengarah angin sebesar  $45^{\circ}$  berlawanan arah jarum jam yang disebut *omni directional guide vanes* (ODGV) lihat gambar 3.25.

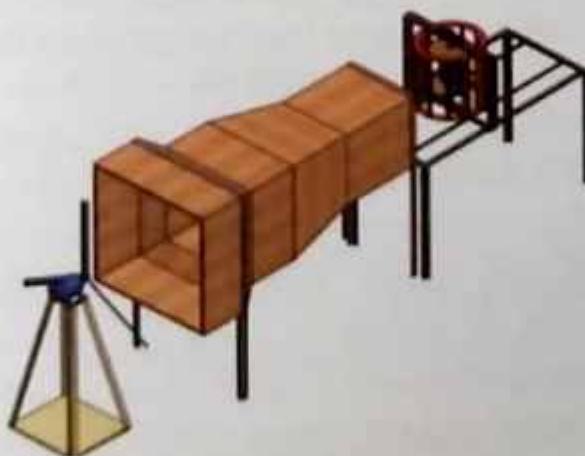
**Tabel 3.2. Spesifikasi Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas dengan Overlapping**

Parameter	Bentuk / Nilai
Profil bilah model turbin angin	C
Jumlah bilah model turbin angin	2
Panjang busur, (mm)	180
Diameter rotor, (mm)	300
Overlap ratio	20 %
Jumlah plat berayun	3 per bilah
Dimensi plat berayun (mm <sup>2</sup> )	30 x 30
Bahan bilah	PVC
Bahan disk atas dan bawah	Arcliryc



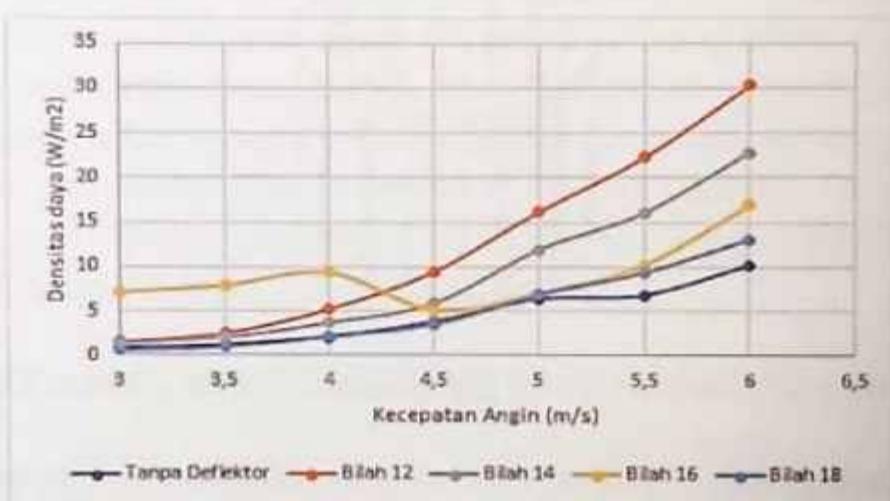
**Gambar 3.25. Desain Omni Directional Guide Vanes (ODGV)**

Instalasi model turbin angin dengan plat berayun bebas serta guide vane-nya dapat dilihat pada gambar 3.26.



**Gambar 3.26. Instalasi Model Turbin Angin dengan Pengarah Angin Tipe Omni Directional Guide Vaness (ODGV)**

Penambahan jumlah bilah pengarah pada ODGV berakibat terjadinya penurunan kinerja dari model turbin angin dengan plat berayun bebas pada bilah lihat gambar 3.27 dan 3.28. Walaupun jika dibandingkan dengan model turbin angin tanpa ODGV, penambahan ODGV yang memiliki kinerja terendah (bilah 18) masih lebih baik daripada model turbin angin dengan plat berayun bebas tanpa ODGV terutama pada kecepatan angin lebih besar daripada 5 m/s. Hal ini juga menunjukkan adanya ODGV mampu meningkatkan kinerja model turbin angin, peningkatan ini terjadi lebih disebabkan massa udara yang menimpa permukaan bilah dari model turbin angin lebih besar

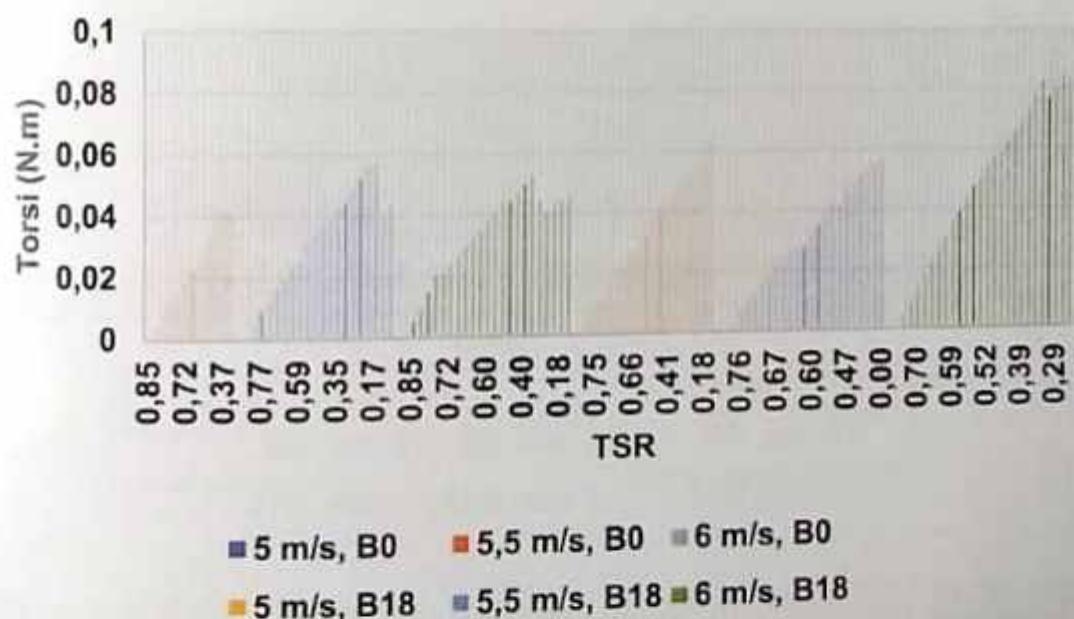


**Gambar 3.27. Densitas Daya dari Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas dengan Variasi Jumlah Bilah Pengarah pada ODGV**

Untuk model turbin angin dengan ODGV daripada tanpa ODGV. Hal ini diduga karena keberadaan ODGV dengan jumlah bilah banyak seperti pada kasus jumlah bilah 18 mampu mengarahkan angin di sisi bilah cembung menuju bilah cekung sehingga gaya yang dihasilkan oleh bilah model dengan ODGV lebih besar daripada model tanpa ODGV kondisi ini diperkuat dengan distribusi torsi yang dihasilkan model turbin angin dengan ODGV (B18) lebih besar daripada model turbin angin tanpa ODGV (B0) lihat gambar 3.29.



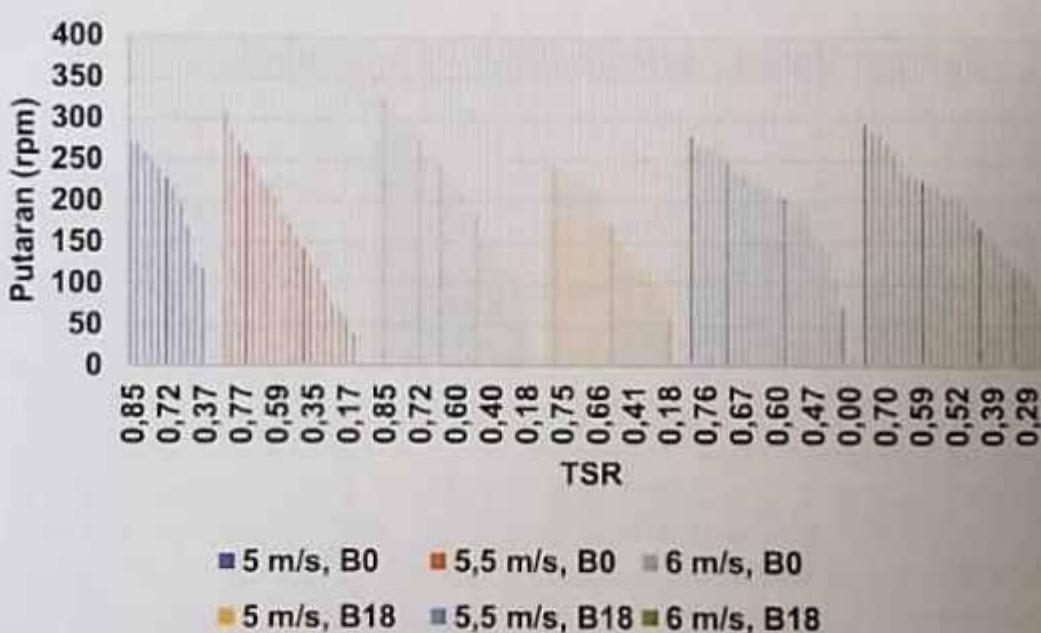
Gambar 3.28. Koefisien Kinerja Maksimum dari Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas pada Tiap Kecepatan Angin dengan Variasi Jumlah Bilah Pengarah pada ODGV



Gambar 3.29. Perbandingan Distribusi Torsi dari Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas antara Model tanpa ODGV (B0) dengan ODGV 18 (B18)

Sebaliknya semakin banyak jumlah bilah ternyata malah menurunkan putaran dari model turbin angin dengan plat berayun bebas, hal ini menunjukkan keberadaan plat pada permukaan bilah

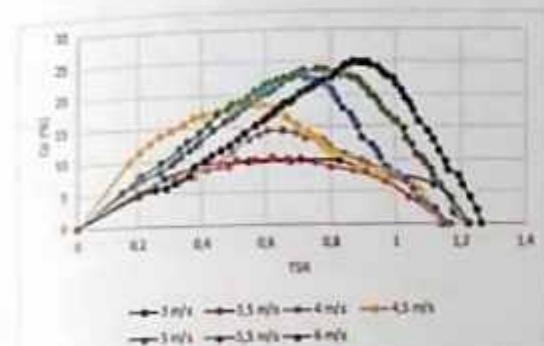
yang bisa berayun bebas mampu meneruskan aliran udara menuju bagian belakang bilah dikarenakan keberadaan dari lubang yang ditutupi oleh bilah yang berayun bebas terbuka karena adanya dorongan angin pada sisi bilah cembung. Begitu pula pada sisi cembung sebagian kecil aliran udara juga bebas menuju bagian belakang bilah karena plat berayun bebas yang menutupi lubang tidak sempurna akibat adanya kombinasi arah radial bilah turbin dan arah angin yang menimpa bilah pada sisi cekung. Hal inilah di duga sebagai penyebab turunnya putaran model turbin angin dengan plat berayun bebas dengan ODGV yang memiliki jumlah bilah yang banyak (B18) lihat gambar dan 3.30.



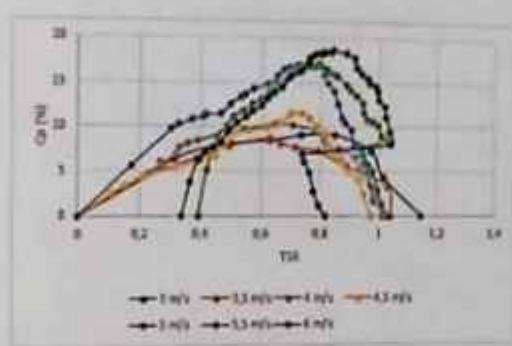
**Gambar 3.30. Perbandingan Distribusi Putaran dari Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas antara Model tanpa ODGV (B0) dengan ODGV 18 (B18)**

Semakin meningkat jumlah bilah pada ODGV berdampak terhadap distribusi koefisien kinerja model turbin angin dengan plat berayun bebas, di mana peningkatan jumlah bilah pada ODGV menyebabkan aliran udara yang masuk kedalam ODGV yang selanjutnya menimpa permukaan bilah model turbin angin

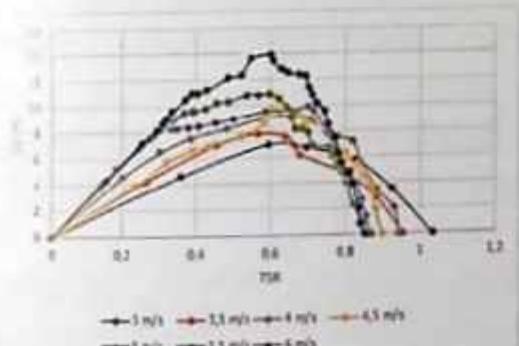
terhambat, hal ini ditunjukkan oleh nilai dari *tip speed ratio* (TSR) yang cenderung bergeser ke kiri menuju lebih kecil dari satu. Hal ini jugalah yang menyebabkan kinerja dari model turbin angin dengan plat berayun bebas menurun di akibatkan massa udara yang menimpa bilah dari model turbin lebih kecil untuk ODGV dengan jumlah bilah yang lebih banyak daripada ODGV dengan jumlah bilah yang lebih sedikit.



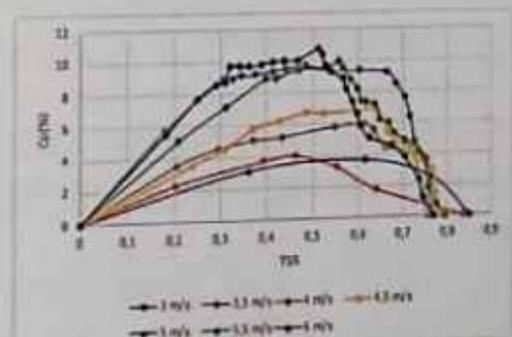
(a) Jumlah bilah ODGV 12



(b) Jumlah bilah ODGV 14

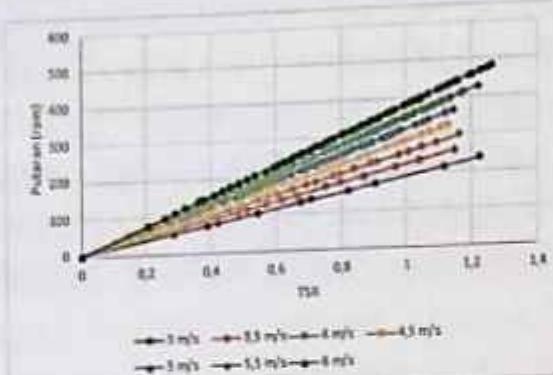


(c) Jumlah bilah ODGV 14

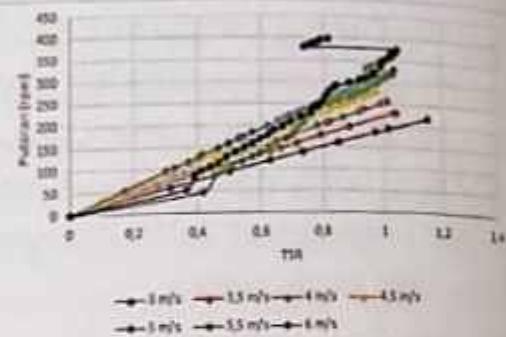


(d) Jumlah bilah ODGV 18

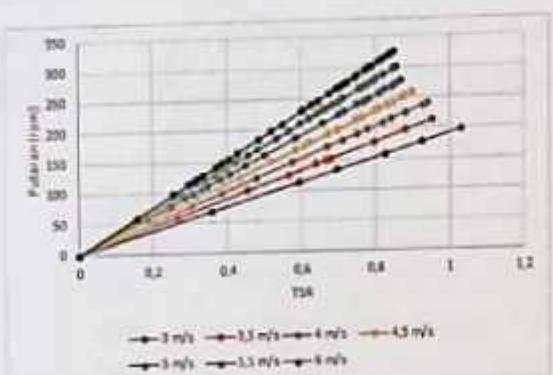
**Gambar 3.31. Pengaruh Jumlah Bilah pada ODGV terhadap Distribusi Koefisien Kinerja dari Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas**



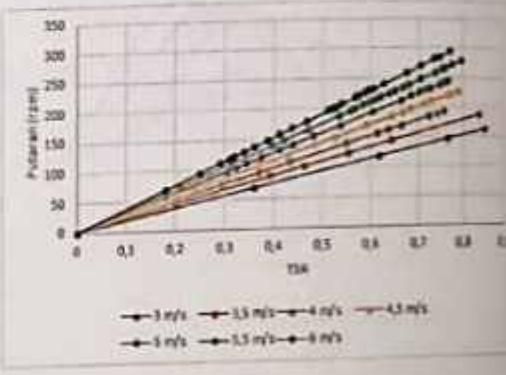
(a) Jumlah Bilah ODGV 12



(b) Jumlah Bilah ODGV 14



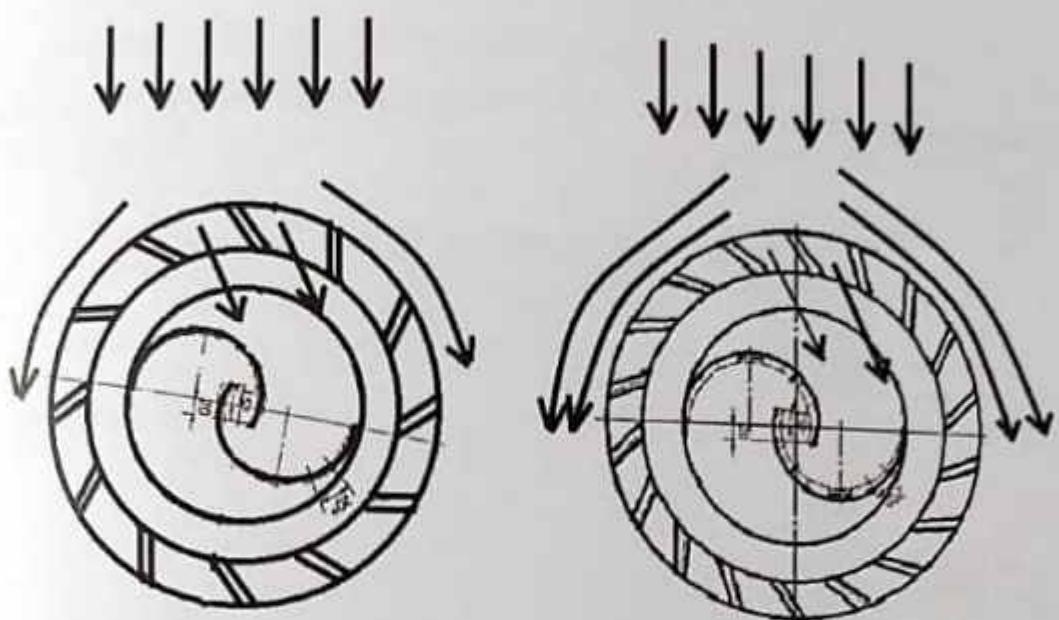
(c) Jumlah Bilah ODGV 16



(d) Jumlah Bilah ODGV 18

**Gambar 3.32. Pengaruh Jumlah Bilah pada ODGV terhadap Putaran dari Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas**

Gambar 3.32 juga mendukung dugaan terkait pengaruh penambahan bilah pada ODGV menyebabkan turunnya kinerja dari model turbin angin dengan plat berayun bebas, semakin bertambah jumlah bilah ODGV maka hambatan juga semakin besar sehingga porsi udara yang mengalir diluar ODGV semakin bertambah sehingga jumlah massa aliran udara menuju model turbin angin menurun, hal inilah yang menyebabkan putaran model turbin semakin menurun seiring bertambahnya bilah ODGV lihat gambar 3.33. Selain itu penambahan jumlah bilah juga menyebabkan peningkatan kecepatan aliran yang masuk ke permukaan bilah sehingga hal ini menyebabkan turunnya *tip speed ratio* hal ini dapat dilihat pada gambar 3.32 semakin bertambah jumlah bilah maka nilai *tip speed ratio* semakin turun.



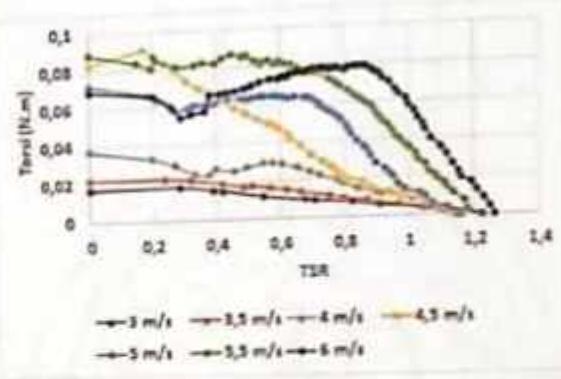
(a) sket aliran melintasi ODGV bilah 12

(b) sket aliran melintasi ODGV bilah 18

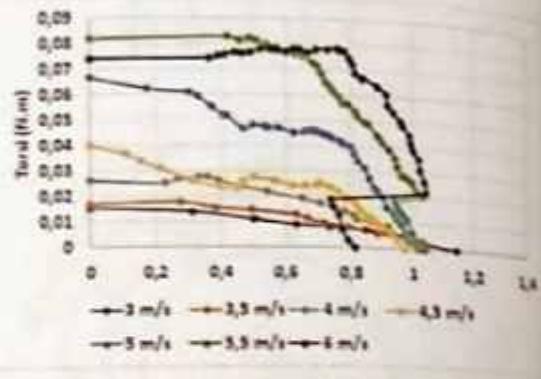
### Gambar 3.33. Sketsa Aliran Udara Melintasi ODGV

Peningkatan jumlah bilah pada ODGV ditinjau dari torsi statik yang dihasilkan oleh model turbin angin dengan plat berayun bebas ada suatu fenomena di mana torsi statik tertinggi jumlah bilah 12 dan 14 terjadi pada kecepatan angin 5,5 m/s sebaliknya untuk jumlah bilah ODGV 16 dan 18 terjadi pada kecepatan angin 6 m/s.

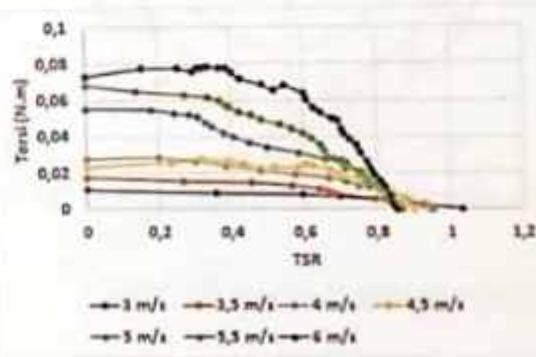
Gambar 3.34. menunjukkan semakin banyak jumlah bilah maka kecepatan angin setelah *guide vane* meningkat tajam, hal ini ditandai dengan nilai TSR yang menurun seiring meningkatnya jumlah bilah karena TSR definisi dari rasio kecepatan angin di ujung bilah dengan kecepatan angin yang menerpa bilah dengan meningkatnya kecepatan angin yang menerpa bilah sebagai pembagi sedangkan kecepatan di ujung bilah relatif sama maka nilai sari TSR akan menurun.



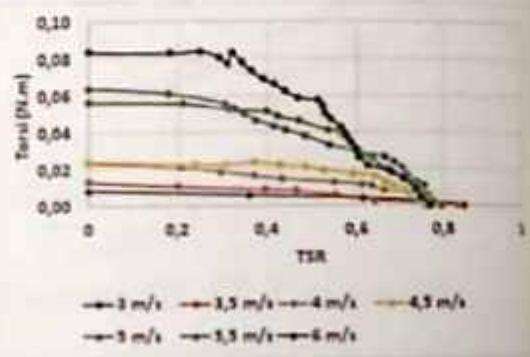
(a) Jumlah Bilah ODGV 12



(b) Jumlah Bilah ODGV 14



(c) Jumlah Bilah ODGV 16



(d) Jumlah Bilah ODGV 18

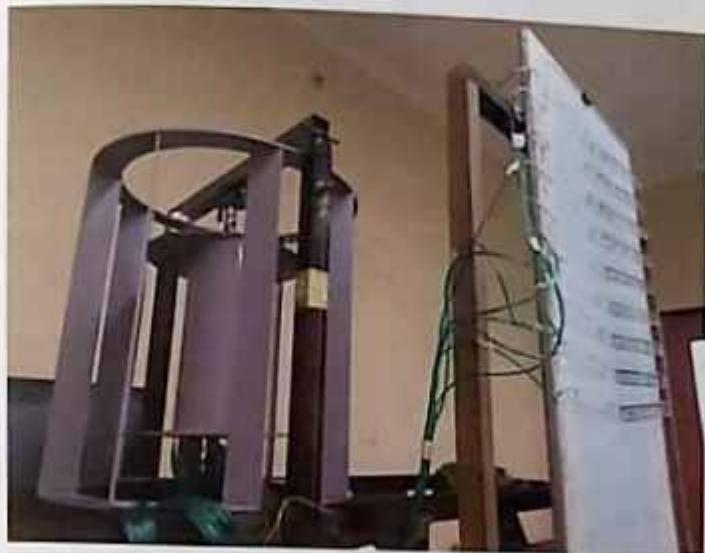
**Gambar 3.34. Pengaruh Jumlah Bilah pada ODGV terhadap Torsi dari Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas**

Selain itu semakin bertambahnya jumlah bilah *guide vane* mampu meningkatkan kemampuan *self starting* dari model turbin angin dengan plat berayun bebas yang ditandai dengan nilai torsi statik maksimum dicapai pada *guide vane* dengan jumlah bilah 18 lihat gambar 3.34.

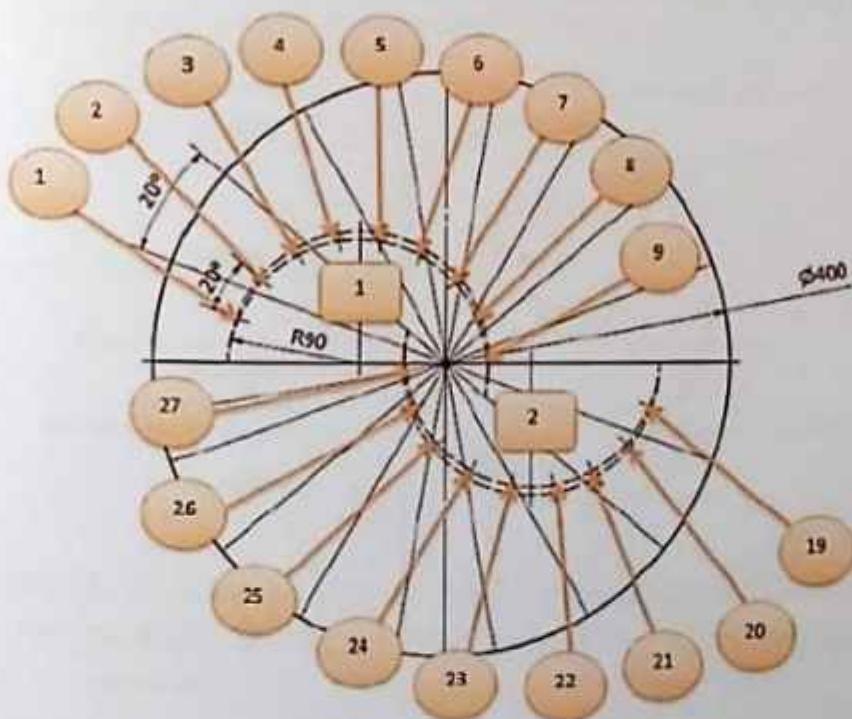
### 3.5. Efek Penambahan Pengarah Angin Jenis *Omnidirectional Guide Vanes* terhadap Distribusi Tekanan pada Permukaan Bilah dengan Plat Berayun Bebas

Perilaku aliran pada permukaan bilah dapat diamati dengan menempatkan *pressure tap* pada permukaan bilah yang kemudian dari *pressure tap* dihubungkan ke manometer untuk membaca tekanan yang terjadi di permukaan bilah lihat gambar 3.35. Adapun urutan *pressure tap* untuk sisi depan bilah cekung adalah tap nomor 1-9 sedangkan sisi dalam bilah cembung adalah tap nomor 19-27

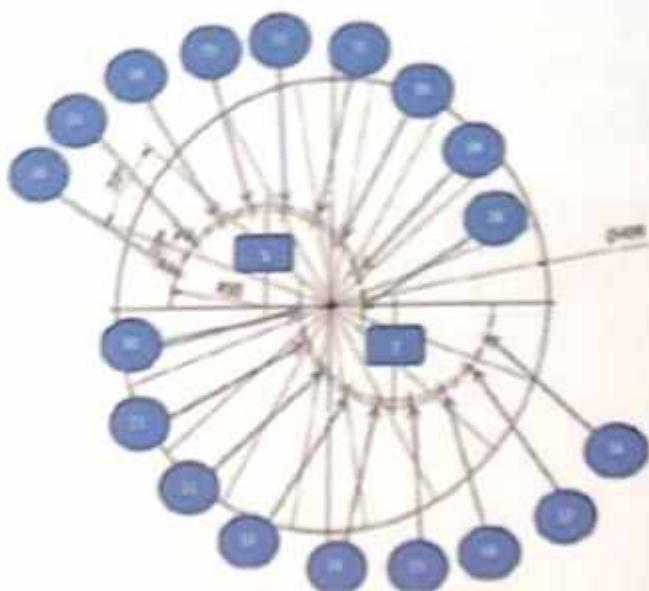
lihat gambar 3.36. Untuk sisi dalam bilah cekung adalah tap nomor 28-36 sedangkan sisi depan bilah cembung adalah tap nomor 10-18 lihat gambar 3.37.



**Gambar 3.35. Pembacaan Tekanan Statik pada Permukaan Bilah dengan Manometer**

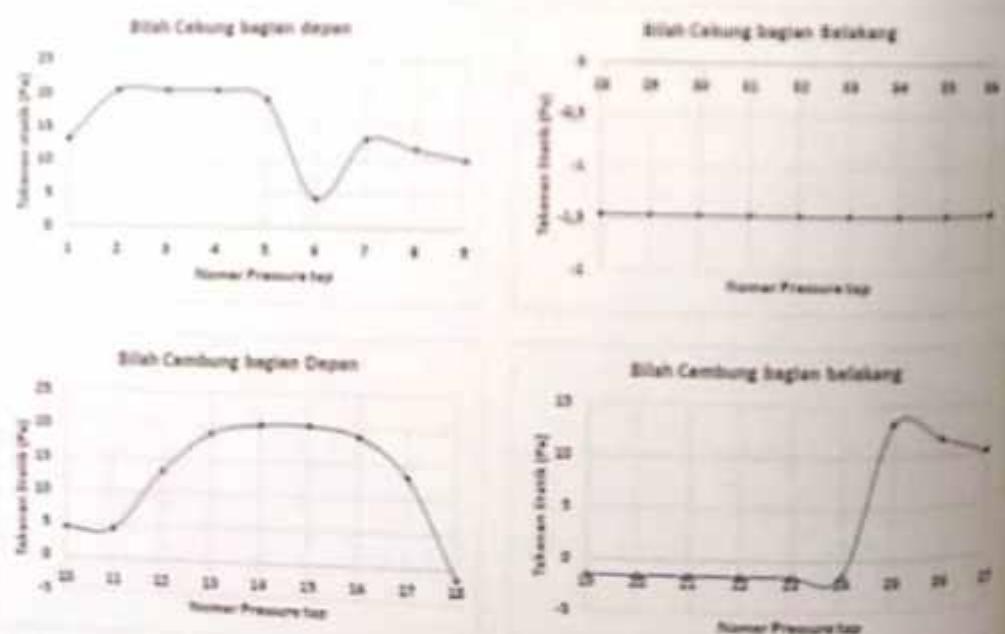


**Gambar 3.36. Posisi Pressure Tap no 1-9 untuk Sisi Cekung dan 19-27 untuk Sisi Cembung**



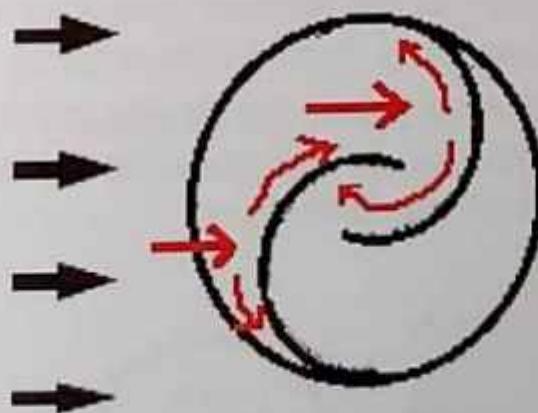
Gambar 3.37. Posisi *Pressure Tap* no 28-36 untuk Sisi Cekung dan 10-18 untuk Sisi Cembung

Hasil pembacaan tekanan statik pada permukaan bilah tanpa *omnidirectional guide vanes* dapat dilihat pada gambar 3.38 dan 3.39 pada posisi bilah tegak lurus dengan arah aliran atau 0 derajat

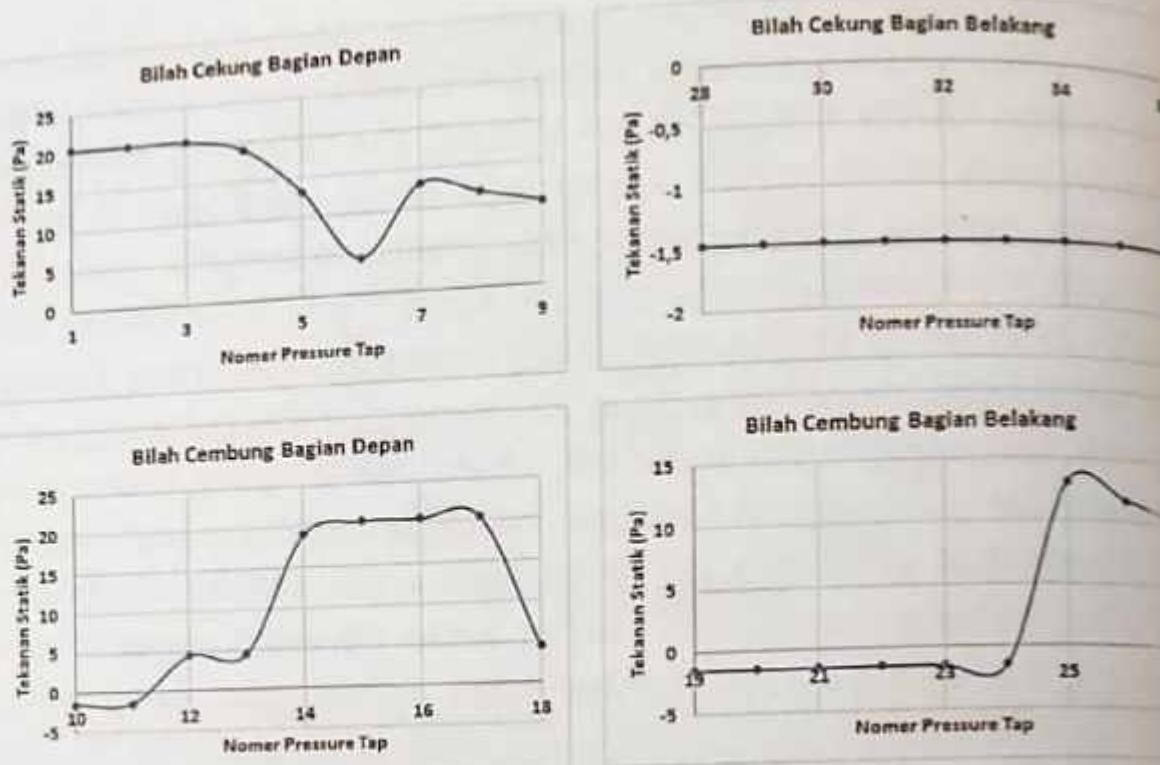


Gambar 3.38. Profil Tekanan Statik Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas tanpa ODGV dengan Sudut Datang Arah Angin  $0^\circ$

Pada posisi angin tegak lurus dengan penampang bilah dari model turbin angin ( sudut  $0^\circ$ ) terlihat bahwa untuk model turbin angin tanpa ODGV baik bilah sisi cekung dan cembung mendapat tekanan yang relatif hampir sama pada permukaan bilah di mana pada sisi cekung menghasilkan torsi positif sedangkan pada sisi cembung menghasilkan torsi negatif, namun ada keuntungan dari desain bilah yang *overlapping* menyebabkan aliran yang berasal dari sisi cekung mendorong bilah cembung dari sisi belakang yang ditandai dengan tekanan pada titik 25,26 dan 27 yang merupakan *pressure tap* pada bagian belakang bilah sisi cembung atau daerah *overlaping* lihat gambar 3.39. Sedangkan untuk daerah dibelakang sisi bilah cekung merupakan daerah *wake* (tekanan negatif) yang tentunya hal ini juga menunjukkan tidak bahwa gaya yang timbul pada permukaan bagian belakang sisi bilah cekung searah dengan gaya yang timbul pada sisi bagian depan sehingga hal ini akan memperbesar torsi positif yang dihasilkan oleh bilah sisi cekung. Desain *overlapping* membawa keuntungan dengan adanya tambahan gaya dari sisi belakang bilah cembung yang memperbesar torsi positif dari model turbin angin.

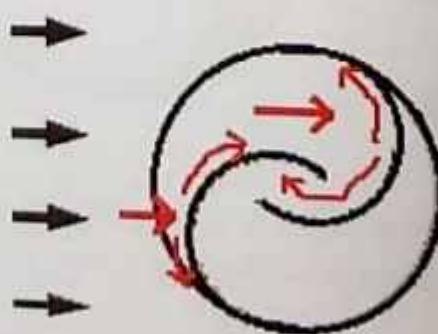


Gambar 3.39. Sketsa Aliran pada Permukaan Bilah Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas tanpa ODGV dengan Sudut  $0^\circ$



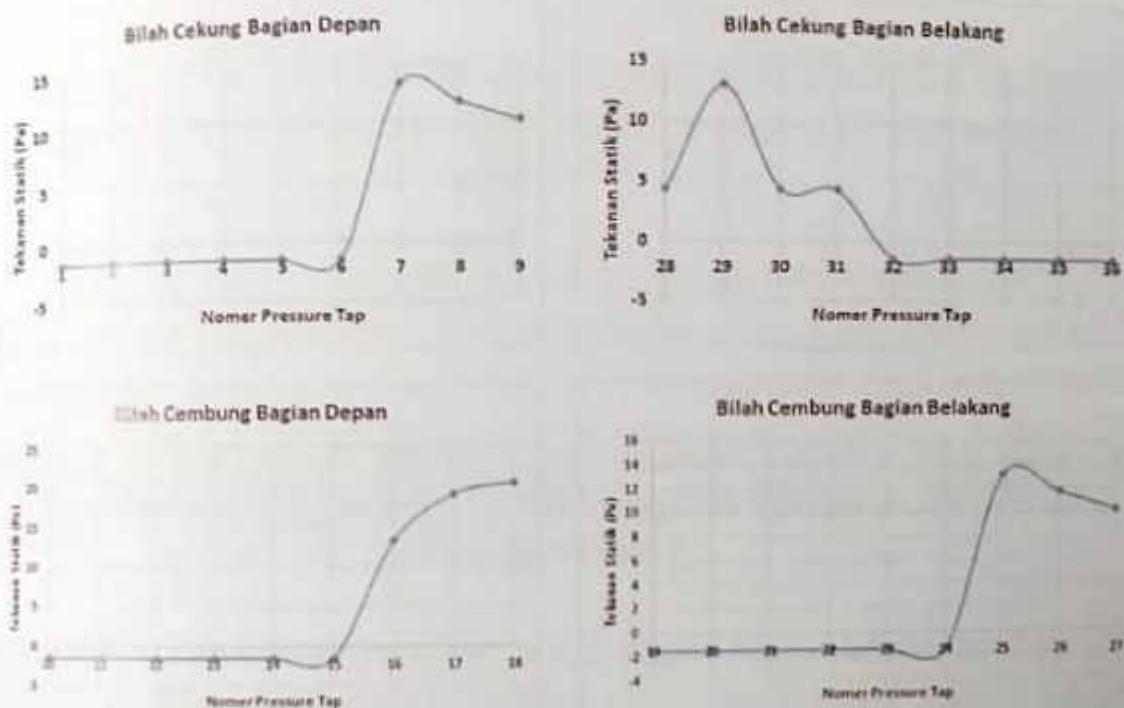
Gambar 3.40. Profil Tekanan Statik Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas tanpa ODGV dengan Sudut Datang Arah Angin  $20^{\circ}$

Pergerakan bilah sehingga bilah membentuk sudut dengan arah angin terlihat pergeseran tekanan yang menimpa bilah cekung dan cembung yang terlihat nilai tekanan maksimum pada nomor *pressure tap* yang terjadi mengalami pergeseran sedangkan pada bagian belakang baik sisi cekung dan cembung terlihat sama lihat gambar 3.37 dan 3.39.

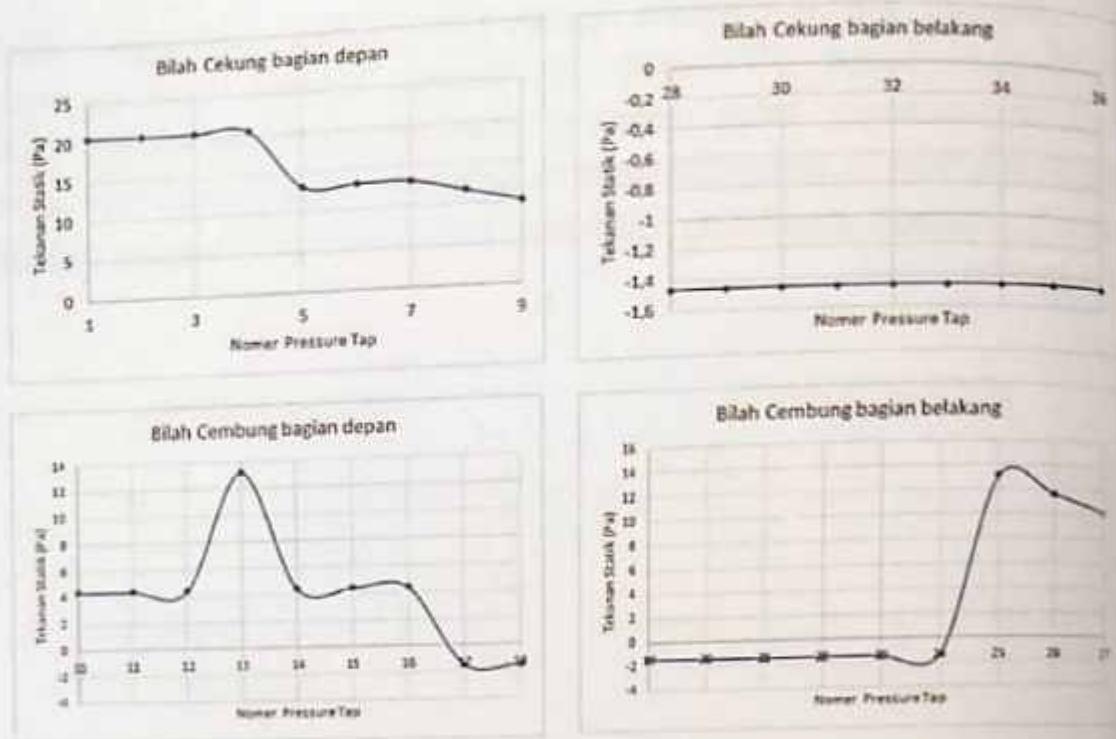


Gambar 3.41. Sketsa Aliran pada Permukaan Bilah Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas tanpa ODGV dengan Sudut  $20^{\circ}$

Seiring bertambahnya pergerakan bilah sehingga bilah membentuk sudut  $80^{\circ}$ , bilah mengalami transisi dari awalnya berposisi sebagai bilah cekung menjadi bilah cembung atau sebaliknya begitu pula sisi bagian belakang dari kedua sisi bilah cekung maupun cembung bertukar posisi menjadi bagian depan lihat gambar 3.42.

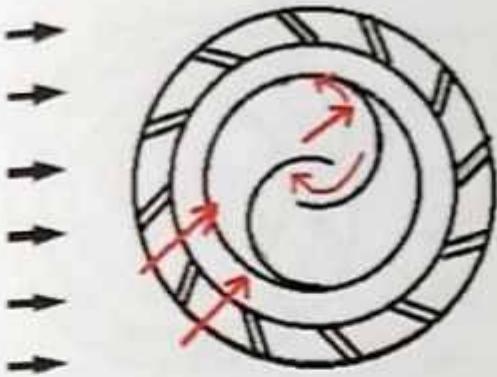


Gambar 3.42. Profil Tekanan Statik Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas tanpa ODGV dengan Sudut Datang Arah Angin  $80^{\circ}$



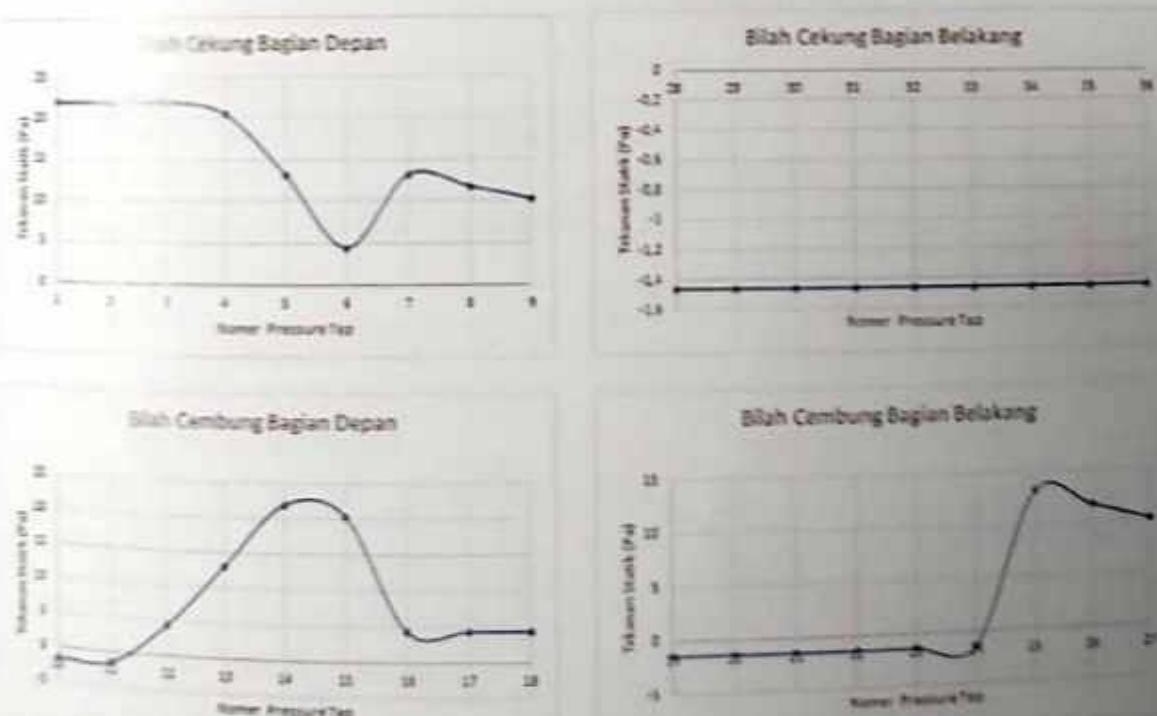
**Gambar 3.43. Profil Tekanan Statik Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas dengan ODGV 12 dengan Sudut Datang Arah Angin  $0^\circ$**

Pada posisi angin tegak lurus dengan penampang bilah dari model turbin angin (sudut  $0^\circ$ ) terlihat bahwa keberadaan ODGV yang mana bilahnya membentuk sudut  $45^\circ$  mampu mendefleksikan arah aliran angin pada permukaan bilah cekung sehingga *pressure tap* no 1 sampai dengan 4 mengalami tekanan maksimum, begitu pula jika ditinjau dari bilah sisi cembung keberadaan ODGV secara umum mengurangi tekanan pada permukaan sisi bilah cembung sehingga keberadaan ODGV mampu meningkatkan perbedaan torsi yang dihasilkan oleh bilah sisi cekung dan cembung. Sedangkan pada sisi bagian belakang bilah sisi cekung dan cembung keberadaan ODGV tidak berpengaruh secara nyata terhadap tekanan yang timbul di permukaan bilah cekung maupun cembung pada sisi bagian belakang. Kondisi ini dapat dilihat dan besar dan bentuk profil distribusi tekanan di *pressure tap* pada bagian belakang bilah tidak begitu berbeda dengan bentuk profil tekanan pada bagian belakang model turbin tanpa ODGV lihat gambar 3.38 dan 3.43.

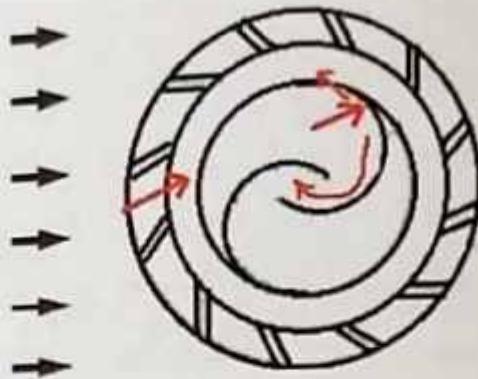


**Gambar 3.44. Sketsa Aliran pada Permukaan Bilah Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas dengan ODGV dengan Sudut  $0^{\circ}$**

Seiring bilah berputar sehingga bilah membentuk sudut  $20^{\circ}$  dengan arah angin terlihat pergeseran tekanan yang menimpa bilah cekung dan cembung yang terlihat nilai tekanan maksimum pada nomor pressure tap yang terjadi mengalami pergeseran sedangkan pada bagian belakang baik sisi cekung dan cembung terlihat masih sama lihat gambar 3.45 dan 3.46.

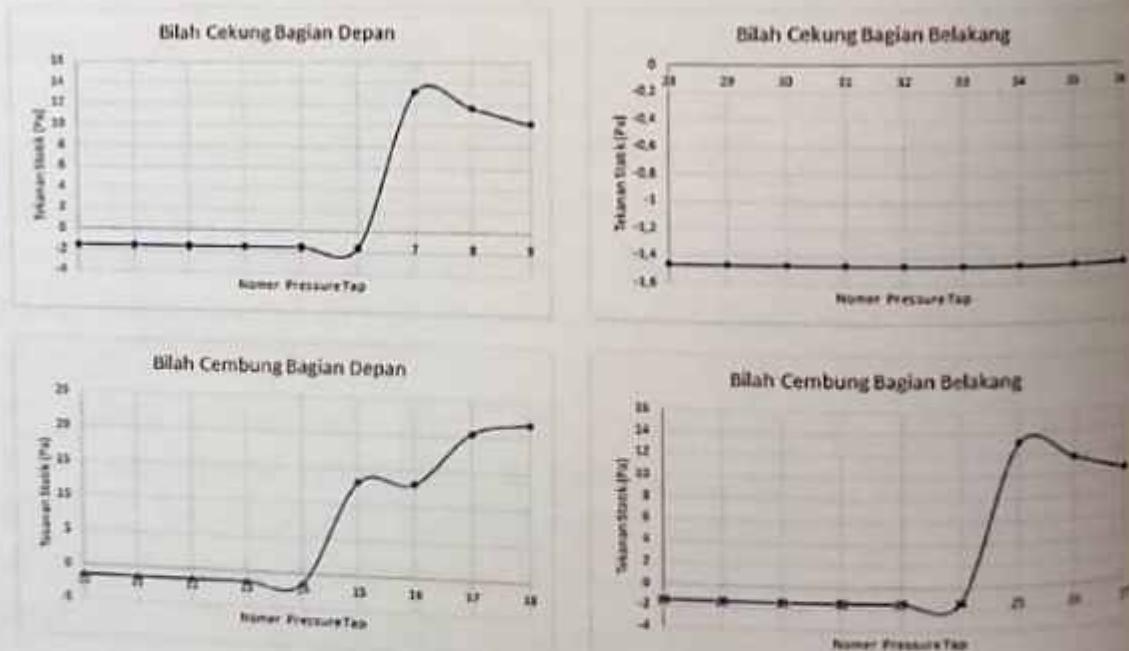


**Gambar 3.45. Profil Tekanan Statik Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas dengan ODGV dengan Sudut Arah Angin  $20^{\circ}$**

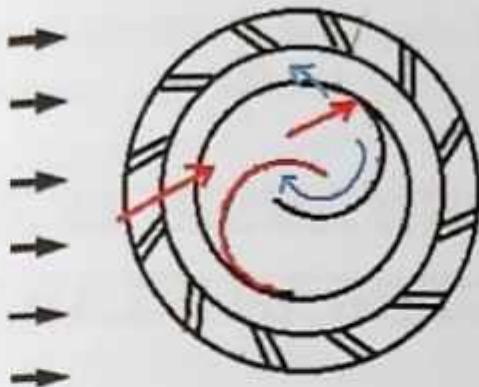


**Gambar 3.46. Sketsa Aliran pada Permukaan Bilah Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas dengan ODGV dengan Sudut Arah Angin  $20^\circ$**

Seperti pada model turbin angin dengan plat berayun bebas tanpa ODGV pertambahan pergerakan bilah sehingga bilah membentuk sudut  $80^\circ$ , bilah mengalami transisi dari awalnya berposisi sebagai bilah cekung menjadi bilah cembung atau sebaliknya begitu pula sisi bagian belakang dari kedua sisi bilah cekung maupun cembung bertukar posisi menjadi bagian depan lihat gambar 3.47.



**Gambar 3.47. Profil Tekanan Statik Model Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas dengan ODGV dengan Sudut Datang Arah Angin  $80^\circ$**



**Gambar 3.48. Sketsa Aliran pada Permukaan Bilah Turbin Angin dengan Plat Berayun Bebas dengan ODGV dengan Sudut Arah Angin  $20^{\circ}$**

Hasil pengembangan model turbin angin berbasis *drag forces* dengan celah di bilah dapat ditabulasikan pada tabel 3.3

**Tabel 3.3. Hasil Pengembangan Model Turbin Angin Berbasis *Drag Forces* dengan Cela Dibilah**

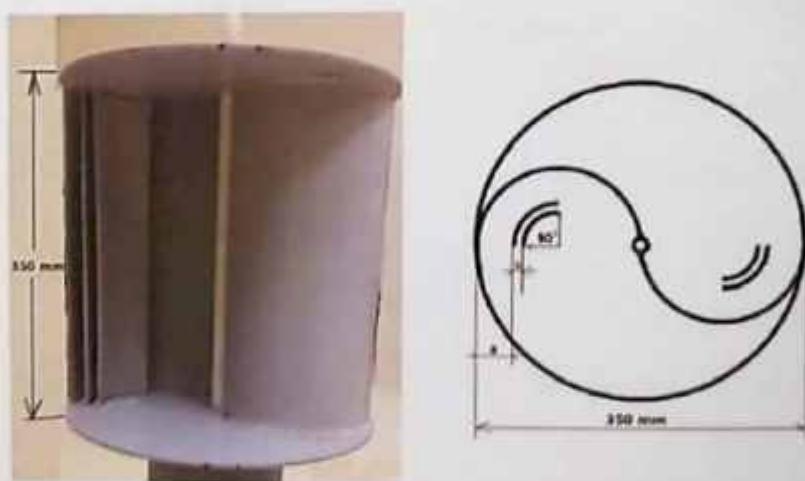
Model Turbin Angin	Densitas Power ( $\text{w/m}^2$ )	Cp max (%)	TSR
Sudut bilah tetap	19,15	15,78	0,70
Plat berayun bebas	27,14	22,38	0,83
Plat berayun bebas dengan pengarah angin tipe <i>pluit box</i>	34,58	28,52	0,89
Plat berayun bebas dengan pengarah angin tipe ODGV	30,31	25	0,87

# 4.

## MODEL TURBIN ANGIN BERBASIS DRAG FORCES DENGAN BILAH TANDEM

### 4.1. Bilah Tandem Ganda dengan Jarak CelaH antara taNdem Tetap dan Jarak Bilah Tandem dengan Bilah Utama Berubah

Upaya meningkatkan kinerja dari model turbin angin berbasis *drag forces* adalah dengan menambahkan bilah tandem ganda didepan bilah utama untuk mengganggu aliran yang menerpa bilah utama seperti yang dilakukan oleh Sharma, dkk. (2016). Selanjutnya bilah tandem ganda didepan bilah utama untuk mengganggu aliran yang menerpa bilah utama disebut bilah pengganggu. Penulis mendesain bilah pengganggu dengan sudut busur  $90^\circ$  dan jarak celah antar bilah tetap sebesar 1 cm dan jarak bila pengganggu yang terdekat dengan bilah utama bervariasi di mana spesifikasi lengkap dari model turbin angin yang dikembangkan beserta dimensinya diuraikan pada tabel 4.1.



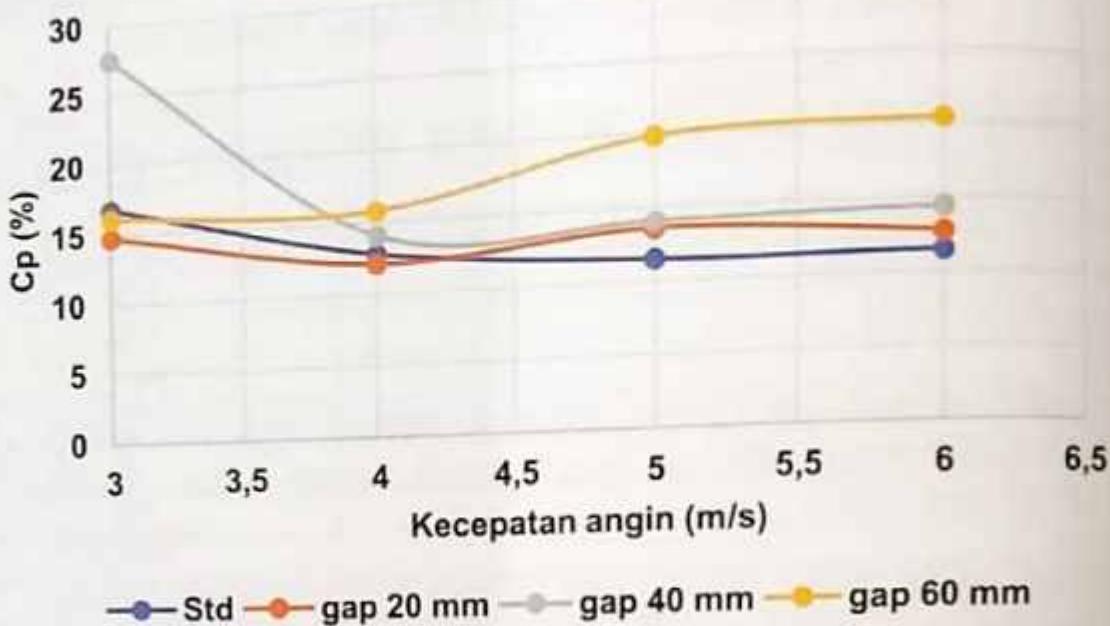
Gambar 4.1. Desain Model Turbin Angin dengan Bilah Pengganggu Ganda dan Dimensinya

**Tabel 4.1. Spesifikasi Model Turbin Angin Bilah Pengganggu Ganda dengan Jarak Cela yang Bervariasi**

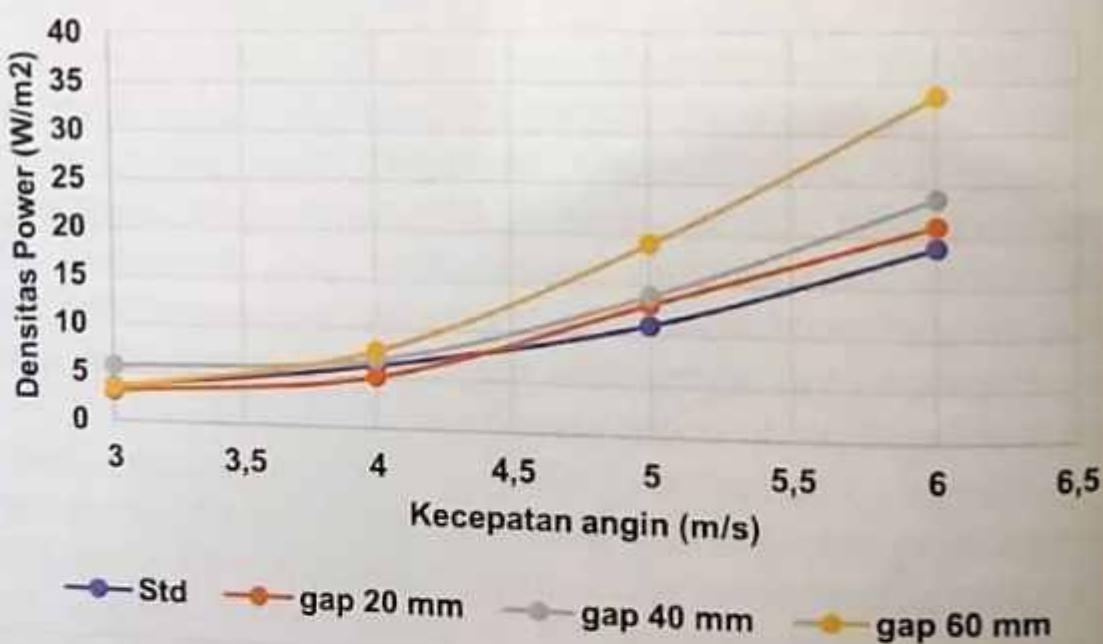
Parameter	Bentuk / Nilai
Profil bilah	C
Jumlah bilah	2
Panjang busur, (mm)	170
Diameter rotor, (mm)	350
Tinggi rotor, (mm)	350
Bahan	PVC
Profil bilah pengganggu	C
Jumlah bilah pengganggu	4
Panjang busur, (mm)	70
Bahan	PVC
Diameter poros, (mm)	15
Bahan bilah	PE
Bahan disk atas dan bawah	PVC

Penambahan bilah pengganggu mampu meningkatkan kinerja model turbin angin pada kecepatan di atas 4 m/s namun pada kecepatan angin di atas 5 m/s kinerja yang dihasilkan oleh model turbin angin relatif konstan hal ini terlihat dari gambar 4.2 dan 4.3. Hal ini di duga karena keberadaan bilah pengganggu di depan bilah utama mampu mengakselerasi kecepatan angin ketika menimpa permukaan bilah utama, selain itu keberadaan bilah pengganggu juga mampu meningkatkan massa udara yang mendorong bilah utama dengan memfokuskan dan menangkap aliran balik dari angin yang menimpa bilah utama serta memperbesar daerah bilah utama yang mendapatkan dorongan yang besar lihat gambar 4.4.

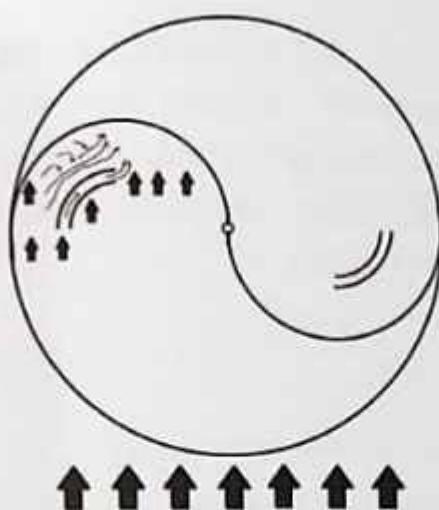
Adanya keberadaan bilah pengganggu juga mampu meningkatkan massa udara yang mendorong bilah utama dapat diklarifikasi dengan meningkatnya putaran model turbin angin ketika tanpa beban lihat gambar 4.5 di mana model dengan bilah pengganggu memiliki kecepatan putar tanpa beban yang lebih tinggi daripada model tanpa bilah pengganggu.



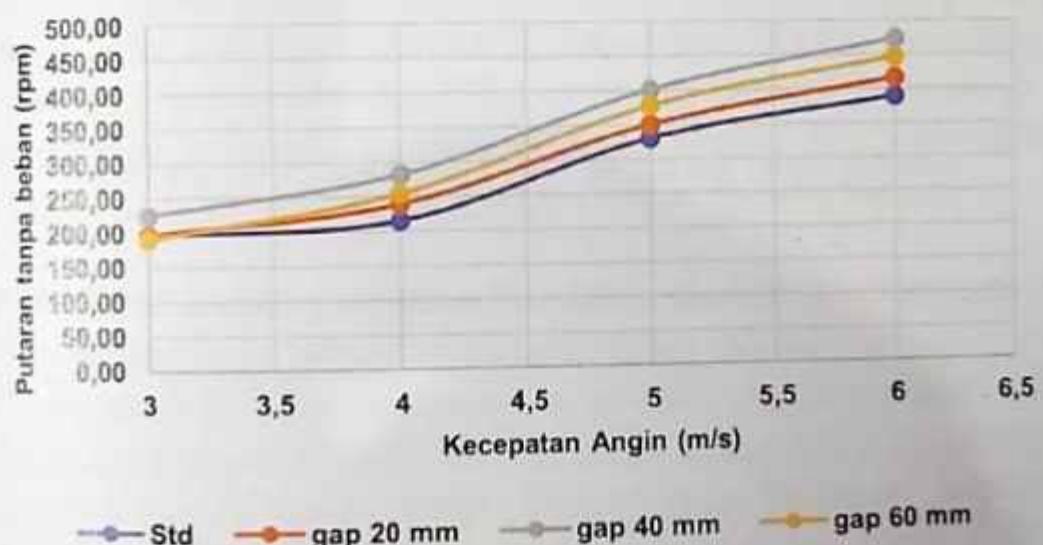
**Gambar 4.2. Koefisien Kinerja Maksimum Model Turbin Angin Pada Variasi Kecepatan Angin**



**Gambar 4.3. Densitas Power Maksimum Model Turbin Angin Pada Variasi Kecepatan Angin**



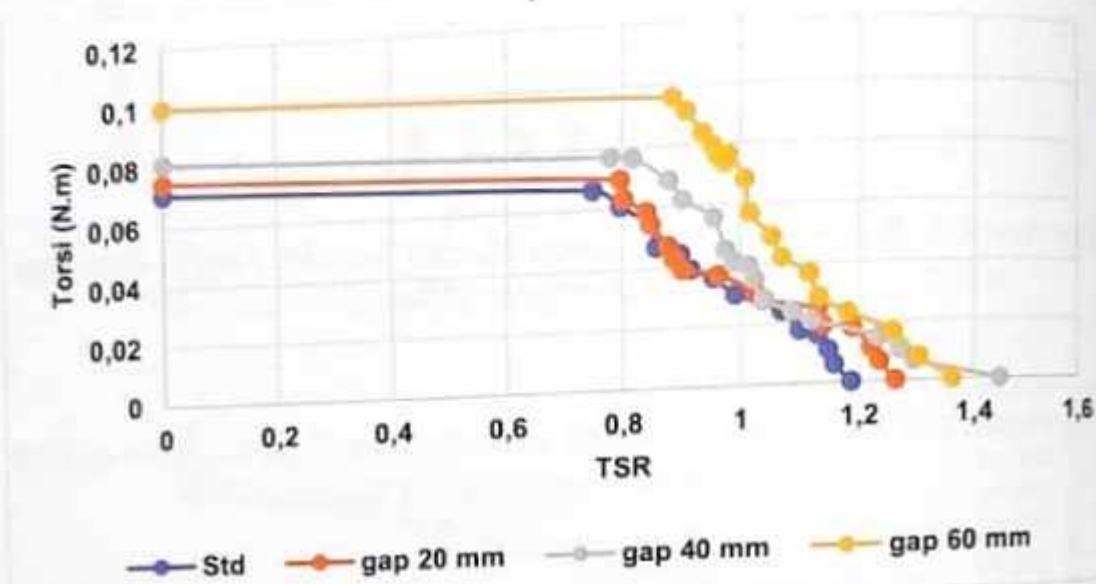
**Gambar 4.4. Ilustrasi Aliran pada Model Turbin Angin dengan Bilah Pengganggu**



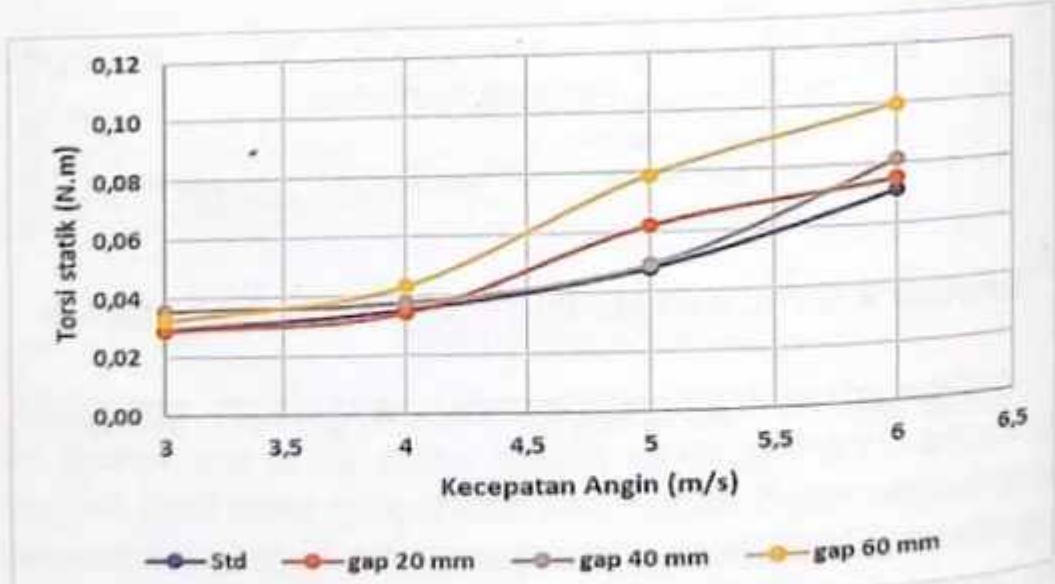
**Gambar 4.5. Putaran Model Turbin Angin Tanpa Beban**

Keberadaan bilah penganggu yang dapat meningkatkan juga mampu meningkatkan massa udara yang mendorong bilah utama dengan memfokuskan dan menangkap aliran balik dari angin yang menimpa bilah utama serta memperbesar daerah bilah utama yang mendapatkan dorongan yang besar terkonfirmasi dengan meningkatnya torsi yang dihasilkan oleh model turbin angin dengan bilah penganggu, lihat gambar 4.6. Selain itu keberadaan bilah

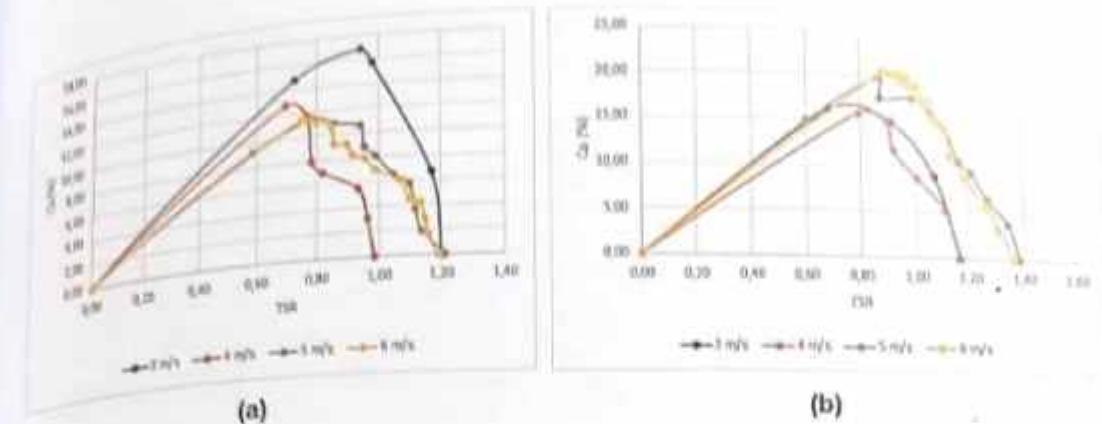
pengganggu juga mampu meningkatkan kemampuan model turbin angin untuk mulai berputar dengan sendirinya atau *self-starting* yang ditandai nilai torsi maksimum dari model turbin angin dengan bilah pengganggu lebih besar daripada model turbin angin tanpa bilah pengganggu lihat gambar 4.7.



Gambar 4.6. Torsi model turbin angin pada variasi TSR



Gambar 4.7. Torsi Statik Model Turbin Angin Pada Variasi Kecepatan Angin

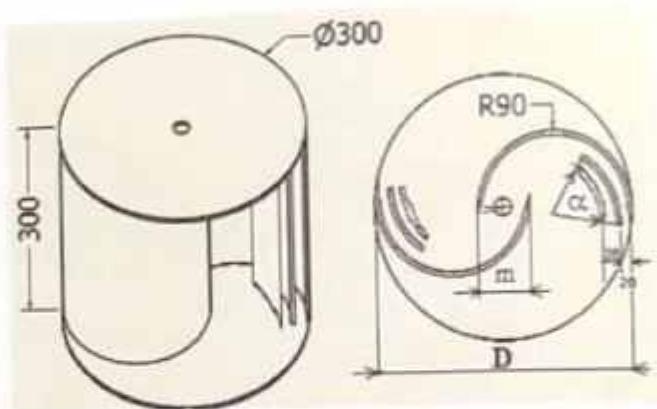


**Gambar 4.8. Profil Koefisien Kinerja Model Turbin Angin (a) Tanpa Pengganggu (b) Dengan Pengganggu**

Keberadaan bilah pengganggu belum mampu mengatasi kelemahan dari jenis turbin angin yang berbasis *drag forces* di mana setelah mencapai puncak dari koefisien kinerja, model turbin langsung kehilangan tenaga atau langsung berhenti, fenomena ini terkonfirmasi pada gambar 4.8 di mana setelah koefisien kinerja mencapai puncaknya langsung terjun bebas menuju titik nol.

#### 4.2. Rasio Luasan Bilah Tandem Ganda sebagai Bilah Pengganggu terhadap Luasan Bilah Utama

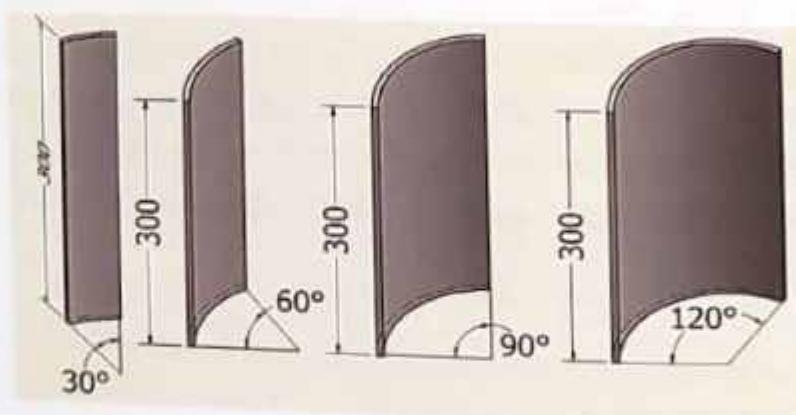
Pada sub bab sebelumnya peneliti menambahkan bilah pengganggu ganda dengan variasi sudut busur bilah pengganggu tetap tapi jarak celah bilah pengganggu terdekat bervariasi sedangkan jarak celah antar bilah pengganggu tetap 2 mm. Sedangkan pada sub bab ini jarak celah antara bilah pengganggu dengan bilah utama dan jarak celah antara kedua bilah pengganggu sama yaitu 20 mm, selain itu bilah utama model turbin angin yang digunakan *overlap* atau dikenal dengan *swirling savonius rotor*.



**Gambar 4.9. Dimensi dan Model Turbin Angin dengan Variasi Sudut Busur Bilah Pengganggu Ganda**

Variabel utama dalam sub bab ini adalah sudut busur bilah kedua bilah pengganggu berubah-ubah sehingga luasan yang dihasilkan dari perubahan sudut busur bilah penganggu terhadap bilah utama menghasilkan suatu perbandingan atau rasio luasan bilah pengganggu dengan bilah utama. Adapun sudut busur bilah penganggu yaitu  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $120^\circ$  lihat gambar 4.10.

Dalam penelitian ini, model turbin angin terbuat dari PVC dengan ketinggian  $H = 300$  mm,  $D = 300$  mm sehingga aspek rasio model turbin angin adalah  $(H/D) = 1$ , dan rasio tumpang tindih ( $m/D$ ) = 20%, jumlah bilah adalah 2 bilah, diameter poros = 15 mm terbuat dari PE untuk lebih jelasnya lihat gambar 4.9, sedangkan detail tambahan lainnya dapat dilihat pada tabel 4.2.

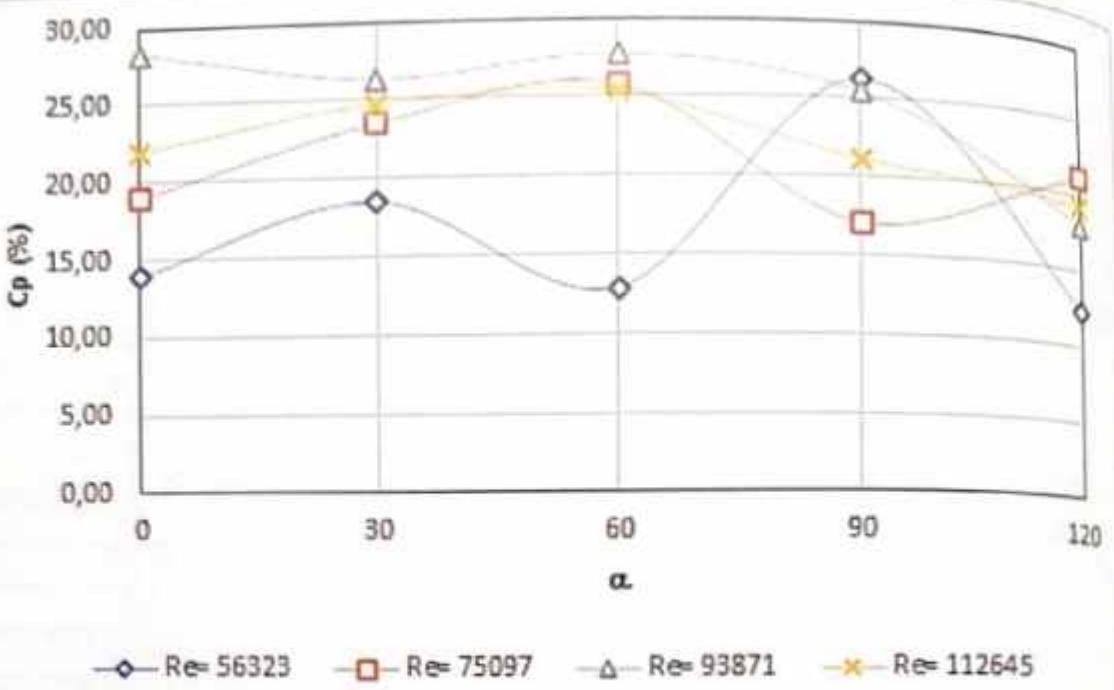


**Gambar 4.10. Desain Bilah Pengganggu Ganda dengan Variasi Sudut Busur**

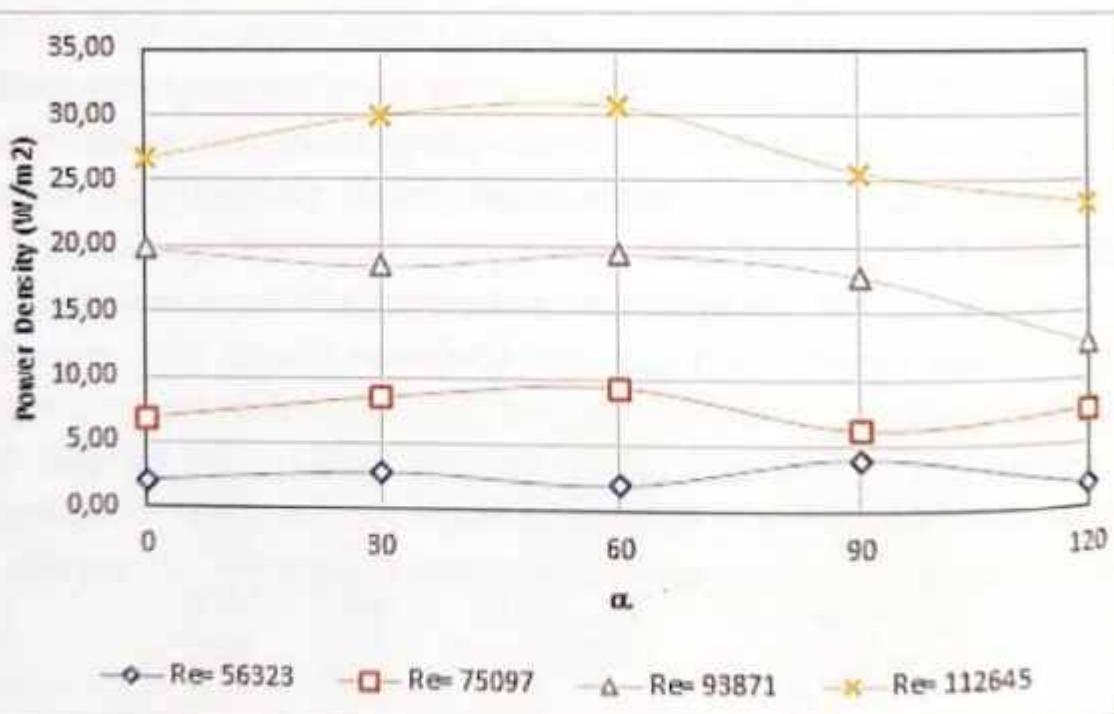
Tabel 4.2. Spesifikasi Model Turbin Angin Bilah Pengganggu Ganda dengan Sudut Busur yang Bervariasi

Parameter	Bentuk / Nilai
Profil bilah	C
Jumlah bilah	2
Panjang busur, (mm)	180
Diameter rotor, (mm)	300
Tinggi rotor, (mm)	300
Bahan	PVC
Profil bilah pengganggu	C
Jumlah bilah pengganggu	4
Panjang busur, (mm)	70
Bahan	PVC
Diameter poros, (mm)	15
Bahan bilah	PE
Bahan disk atas dan bawah	PVC

Penambahan bilah pengganggu dengan sudut busur yang bervariasi seperti pada pembahasan sub bab sebelumnya mampu meningkatkan kinerja model turbin angin pada bilangan Reynolds besar atau setara pada kecepatan angin mulai 5 m/s. Pada kecepatan tinggi pengaruh bilah ganda penganggu mulai terlihat walaupun hanya pada sudut busur yang kecil sedangkan pada sudut busur yang besar keberadaan bilah penganggu kurang signifikan. Bilangan Reynolds 93871 yang setara dengan kecepatan angin 5 m/s adalah titik optimum pada model ini karena setelah itu kinerja model turbin angin dari sisi koefisien kinerja ( $C_p$ ) menurun lihat gambar 4.11. Hal ini dikarenakan semakin meningkatnya kecepatan angin maka pada posisi tertentu angin yang berasal dari *free stream* menghambat aliran dari celah antara bilah penganggu dengan bilah utama dan celah antar bilah penganggu itu sendiri.

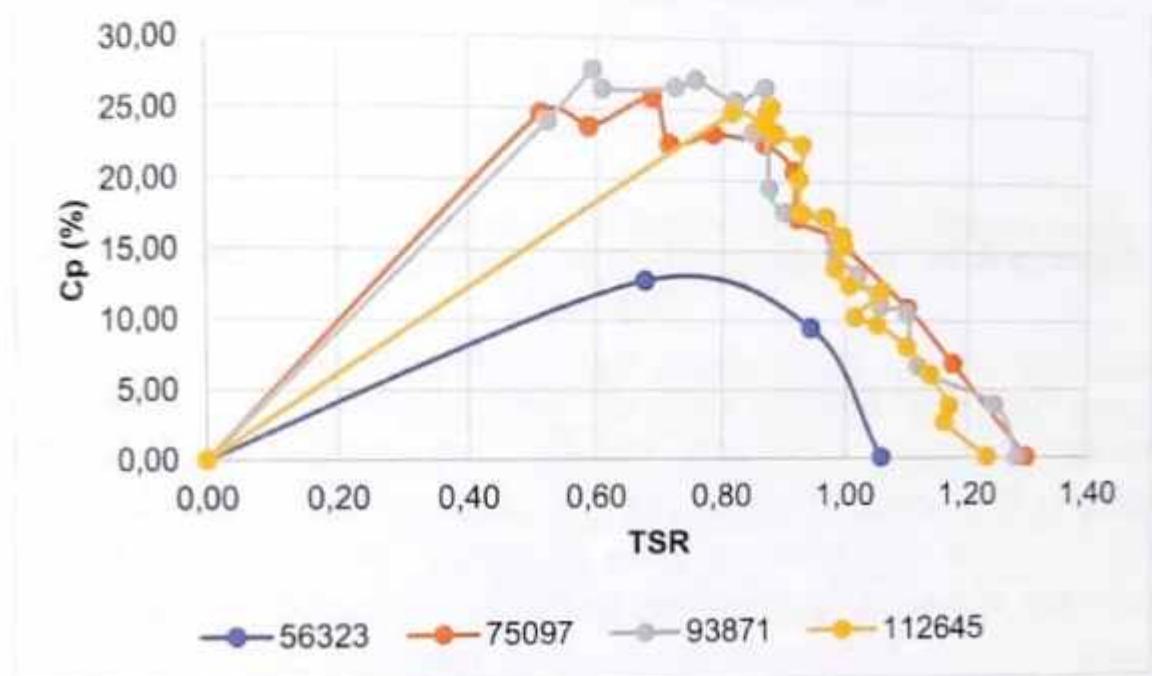


**Gambar 4.11. Koefisien Kinerja Maksimum Model Turbin Angin pada Variasi Bilangan Reynolds**



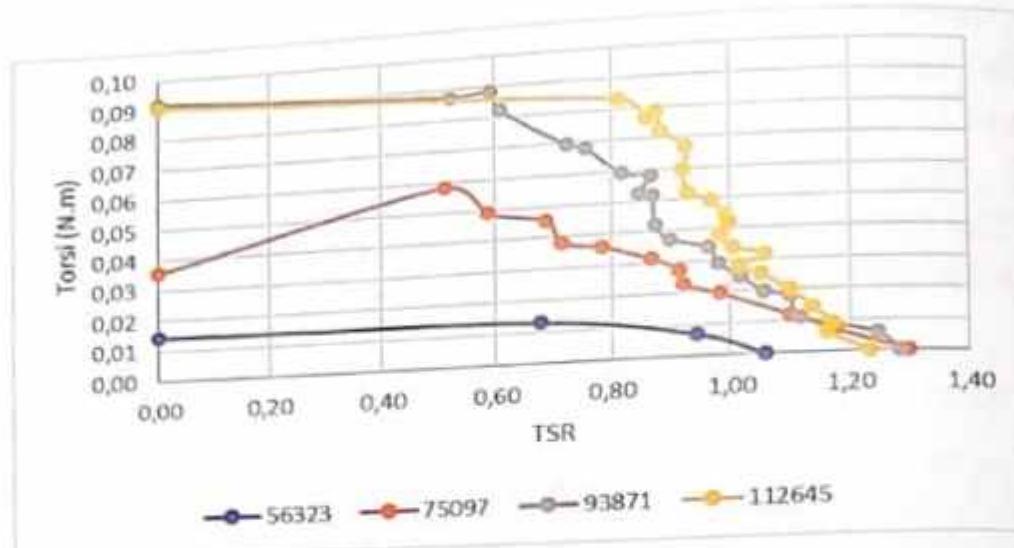
**Gambar 4.12. Densitas Daya Maksimum Model Turbin Angin pada Variasi Bilangan Reynolds**

Gambar 4.11 dan 4.12 memperlihatkan bahwa sudut busur  $60^\circ$  dari bilah pengganggu menghasilkan kinerja yang terbaik baik dari sisi koefisien kinerja ( $C_p$ ) dan densitas daya yang dihasilkan. Untuk selanjutnya akan diuraikan pengaruh kecepatan angin terhadap karakteristik model turbin angin dengan bilah pengganggu ganda dengan sudut busur  $60^\circ$ .



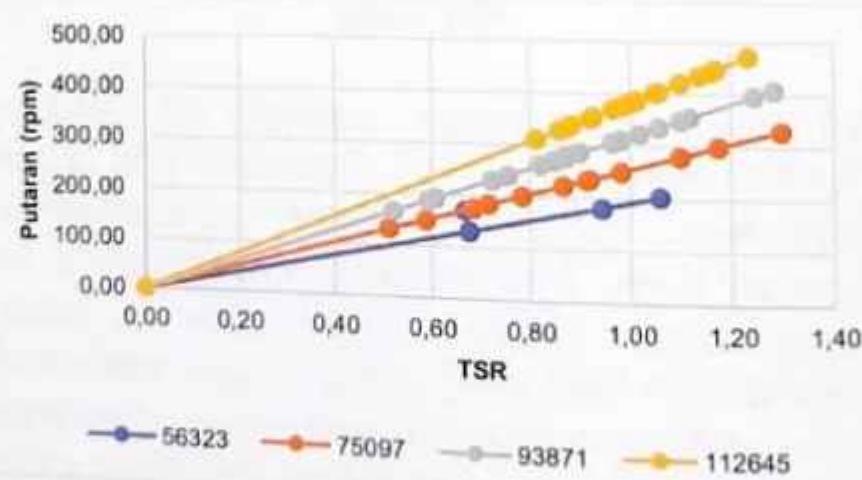
**Gambar 4.13. Profil Koefisien Kinerja Model Turbin Angin dengan Sudut Busur Pengganggu  $60^\circ$  pada Variasi Bilangan Reynolds**

Sudut busur pengganggu sebesar  $60^\circ$  mencapai nilai koefisien kinerja terbaik sebesar 27,73 % pada nilai *tip speed rasio* sebesar 0,59 pada bilangan Reynolds 93871 atau setara dengan kecepatan angin 5 m/s. Pada kondisi ini model turbin angin lebih kuat terhadap beban daripada kondisi lain di mana hal ini ditunjukkan nilai TSR nya yang paling rendah lihat gambar 4.13. Selain itu torsi statik yang dihasilkan oleh model sama bahkan lebih tinggi sedikit daripada torsi statik yang dihasilkan pada kondisi bilangan Reynolds 112645 atau setara dengan kecepatan angin 6 m/s lihat gambar 4.14.

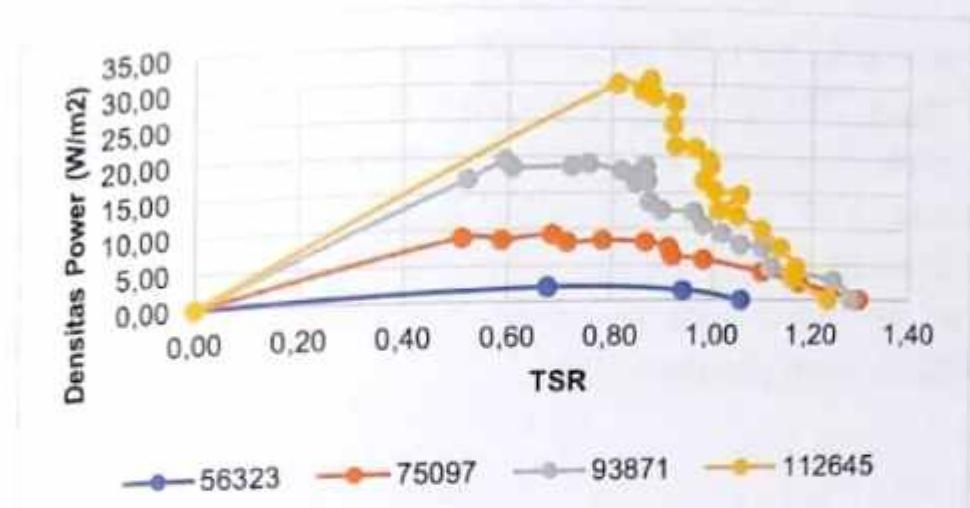


Gambar 4.14. Torsi Model Turbin Angin pada Variasi Bilangan Reynolds

Walaupun putaran yang dihasilkan model turbin angin pada kondisi bilangan Reynolds 112645 lihat gambar 4.15, namun dengan torsi yang dihasilkan hampir sama dengan kondisi bilangan 93871 maka dari efisiensi yang dihasilkan lebih rendah. Sedang densitas power yang dihasilkan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin yang menerpa bilah dari model turbin angin dengan densitas daya yang dihasilkan terbesar pada *tip speed ratio* 0,88 sebesar  $30,82 \text{ W/m}^2$  lihat gambar 4.16.



Gambar 4.15. Putaran Model Turbin Angin pada Variasi Bilangan Reynolds



Gambar 4.16. Profil Densitas Daya Model Turbin Angin pada Variasi Bilangan Reynolds

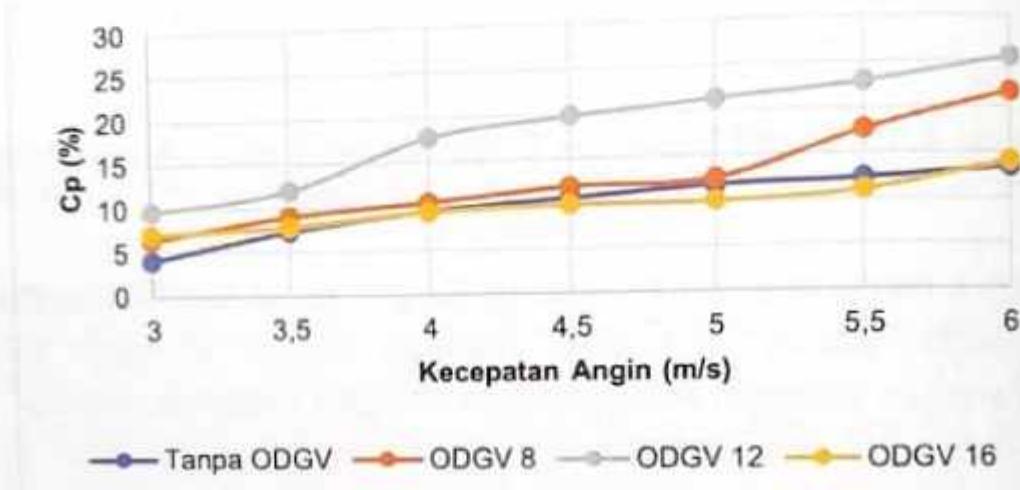
#### 4.3. Efek Penambahan Pengarah Angin Jenis *Omnidirectional Guide Vanes* terhadap Kinerja Model dengan Bilah Tandem sebagai Pengganggu dengan Sudut Busur 60°

Pada sub bab sebelumnya dijelaskan model dengan bilah tandem sebagai pengganggu dengan sudut busur 60° menghasilkan kinerja yang terbaik. Kemudian model ini ditempatkan pada pengarah angin jenis *Omnidirectional Guide Vane* (ODGV) untuk melihat bagaimana pengaruh penambahan ODGV terhadap kinerja model turbin angin lihat gambar 4.17.



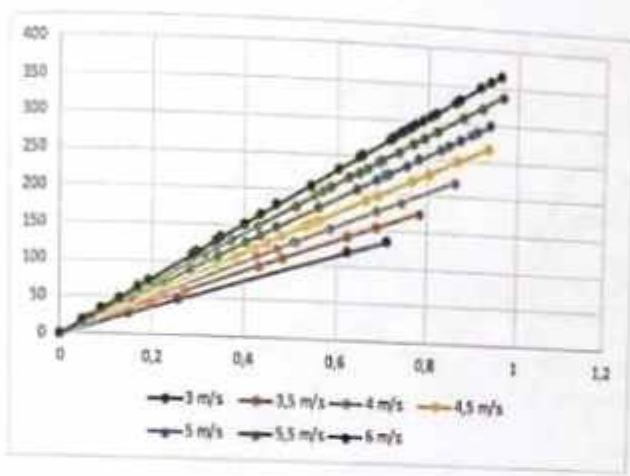
Gambar 4.17. Model Turbin Angin dengan ODGV

Pada sub bab ini perlakuan yang diberikan berupa variasi jumlah bilah ODGV yang mengitari model turbin angin dengan variasi bilah 8,12 dan 16 dan sudut pengarah angin sebesar  $45^\circ$  berlawanan arah jarum jam. Hasil penelitian memaparkan bahwa jumlah bilah pengarah pada ODGV 12 memiliki berpengaruh yang signifikan terhadap kinerja model turbin angin jika dibandingkan tanpa ODGV lihat gambar 4.18.

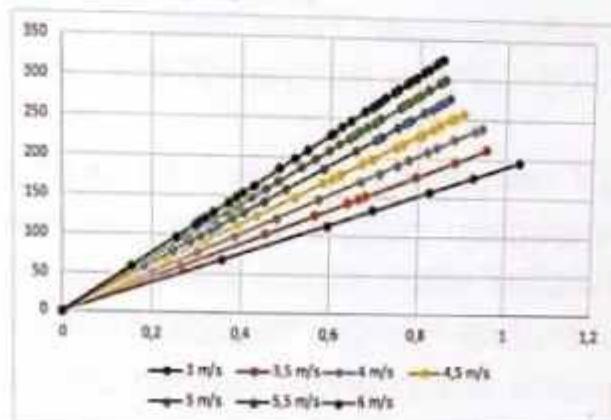


**Gambar 4.18. Koefisien Kinerja Maksimum dari Model Turbin Angin pada Tiap Kecepatan Angin dengan Variasi Jumlah Bilah Pengarah pada ODGV**

Sedangkan untuk ODGV dengan jumlah bilah 16 tidak memiliki pengaruh yang cukup signifikan, hal ini di duga pada ODGV 16 jumlah yang banyak menyebabkan jarak antar bilah semakin sempit sehingga banyak massa udara yang mengalir di daerah luar ODGV terutama pada kecepatan tinggi, hal ini ditandai dengan putaran yang dihasilkan ODGV 16 lebih rendah daripada model turbin tanpa ODGV lihat gambar 4.19. dan 4.20. Walaupun massa udara yang masuk ke dalam ODGV lebih kecil, tapi dengan adanya bilah yang posisinya menyudut  $45^\circ$  menghalangi aliran menghantam permukaan bilah cembung sehingga hal ini mereduksi torsi negatif yang dihasilkan oleh bilah cembung. Hal inilah yang menyebabkan torsi yang dihasilkan antara model turbin tanpa ODGV dan dengan ODGV 16 hampir sama lihat gambar 4.21.

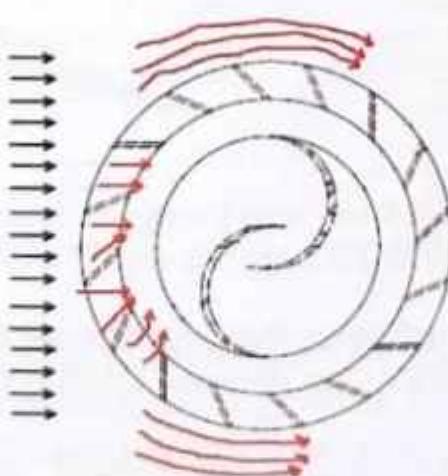


(a) Tanpa ODGV

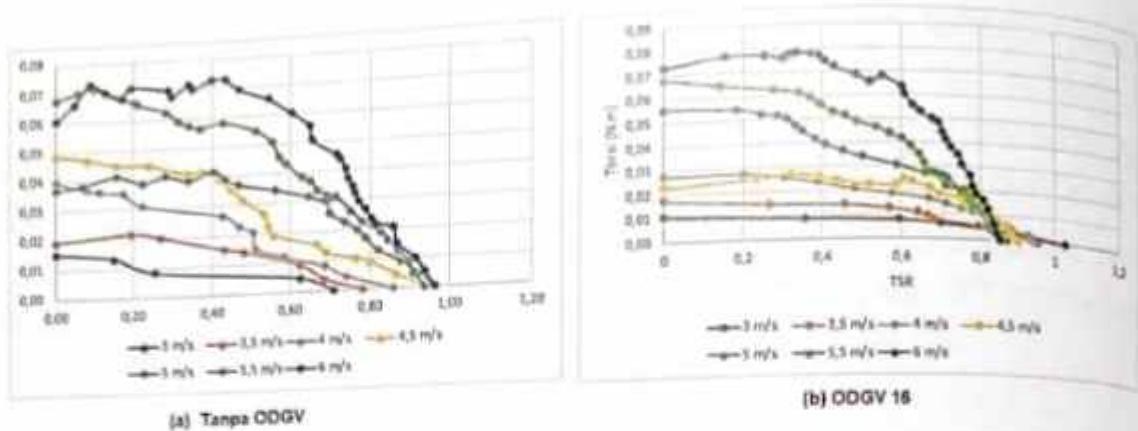


(b) ODGV 16

**Gambar 4.19.** Perbandingan putaran model turbin angin tanpa ODGV dan dengan ODGV 16

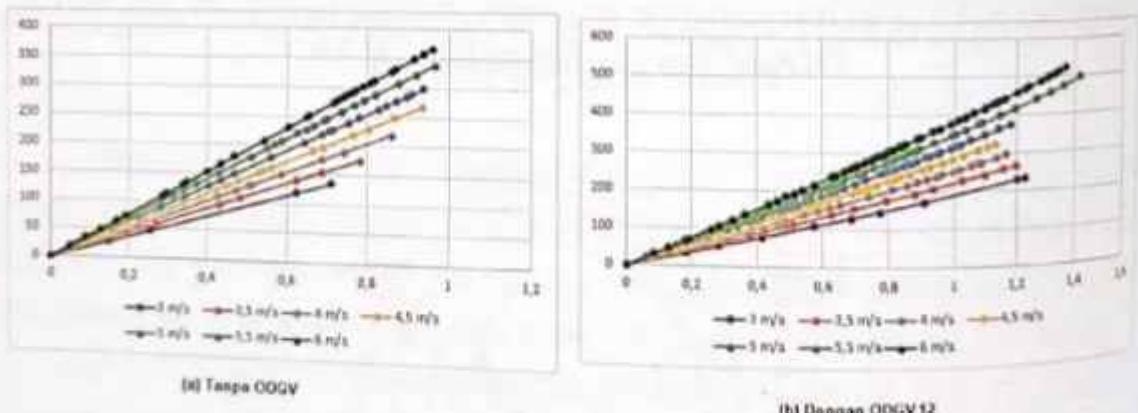


**Gambar 4.20.** Prediksi Pola Aliran pada Sebelum dan Sesudah ODGV dengan Jumlah Bilah 16



**Gambar 4.21. Perbandingan Torsi Model Turbin Angin tanpa ODGV dan dengan ODGV 16**

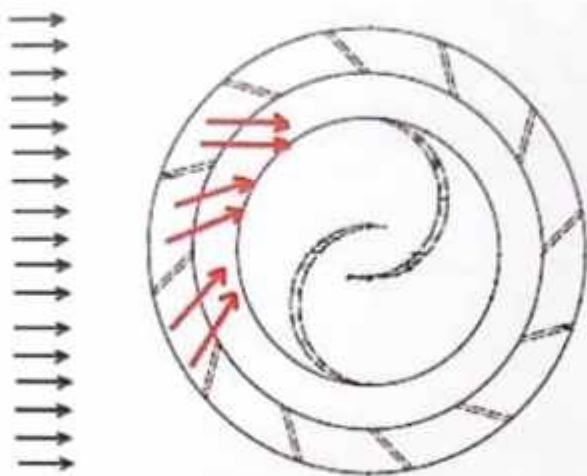
Untuk ODGV dengan jumlah bilah 12 jarak celah antar bilah pada ODGV memberikan pengaruh yang optimal di mana pada kondisi ini aliran udara yang masuk ke dalam ODGV mengalami percepatan yang ditandai dengan kecepatan putar dan TSR yang dihasilkan oleh model turbin angin dengan ODGV 12 lebih tinggi daripada kecepatan putar model turbin angin tanpa ODGV lihat gambar 4.22.



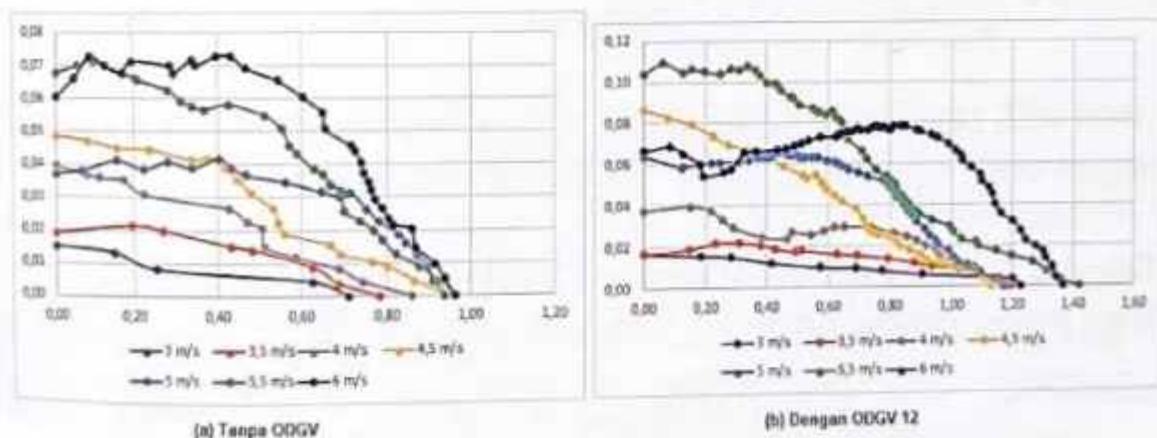
**Gambar 4.22. Perbandingan Putaran Model Turbin Angin tanpa ODGV dan dengan ODGV 12**

Selain itu keberadaan bilah ODGV yang menyudut  $45^\circ$  menghalangi aliran udara untuk langsung membentur permukaan bilah cembung sehingga torsi negatif yang dihasilkan oleh bilah cembung berkurang atau hilang akibatnya torsi yang dihasilkan

model turbin angin dengan ODGV 12 lebih besar daripada torsi yang dihasilkan model turbin angin tanpa ODGV lihat gambar 4.23 dan 4.24.

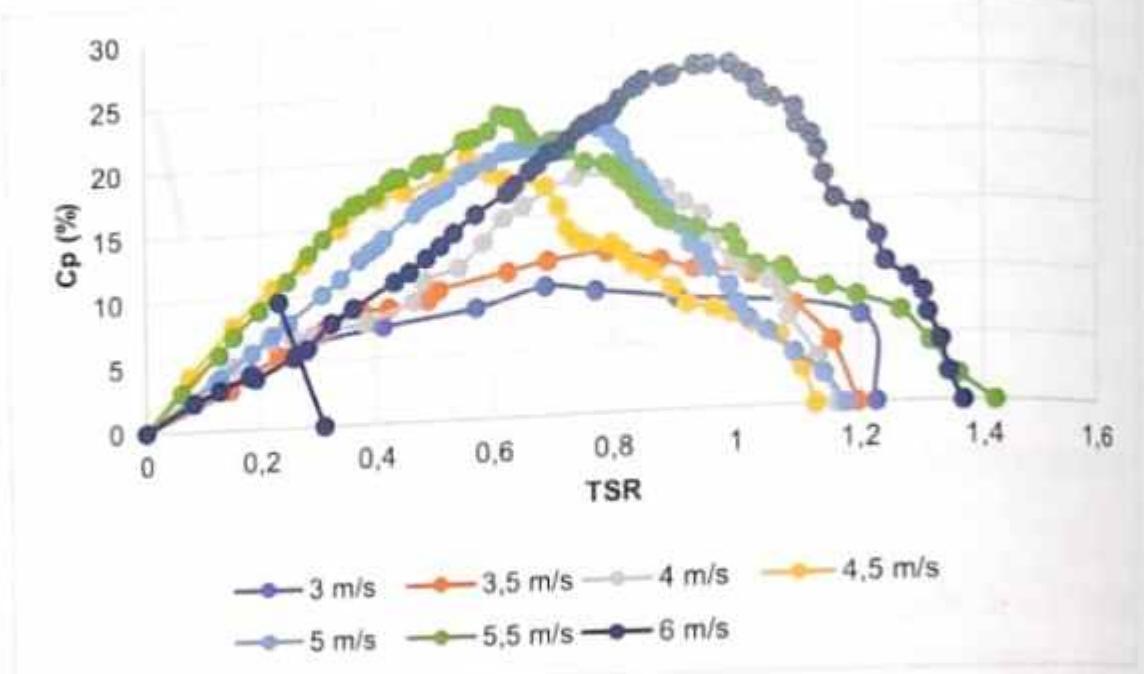


Gambar 4.23. Prediksi Pola Aliran pada Sebelum dan Sesudah ODGV dengan Jumlah Bilah 16



Gambar 4.24. Perbandingan Torsi Model Turbin Angin tanpa ODGV dan dengan ODGV 12.

Pada model turbin angin dengan ODGV 12 kinerjanya semakin meningkat seiring meningkatnya kecepatan angin dalam rentang 3 s.d. 6 m/s. Hal ini ditunjukkan oleh gambar 4.18 dan 4.25 dengan kinerja maksimum yang bisa dicapai sebesar 25,47 % pada TSR 0,99.



Gambar 4.25. Distribusi Koefisien Kinerja Model Turbin Angin dengan ODGV 12 dengan Variasi Kecepatan Angin yang Diujikan.

Hasil pengembangan model turbin angin berbasis *drag forces* dengan bilah tandem dapat ditabulasikan pada tabel 4.3.

Tabel 4.3. Hasil Pengembangan Model Turbin Angin Berbasis *Drag Forces* dengan Bilah Tandem sebagai Bilah Pengganggu.

Model Turbin Angin	$C_p$ Max (%)	TSR
Jarak celah bilah tandem 6 mm sudut busur bilah pengganggu tetap $90^\circ$	20,39	0,86
Bilah tandem dengan sudut busur bilah pengganggu sebesar $60^\circ$ jarak antar bilah tetap 2 mm	27	0,66
Bilah tandem dengan sudut busur bilah pengganggu sebesar $60^\circ$ jarak antar bilah tetap 2 mm dengan pengarah angin ODGV	25,47	0,99

## SUMBER PUSTAKA

- Ali, M.H. 2013. "Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed." *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. vol. 3. no. 5. pp. 2978–2986.
- er-Bugger S. South-east-asia--modest-additions-scene-set-expansion. Available from <http://www.windpowermonthly.com/article/1172034>. accessed at 1 March 2013.
- Habibie, M. Najib. 2011. Achmad Sasmito. Roni Kurniawan. Kajian Potensi Energi Angin di Wilayah Sulawesi dan Maluku. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*. VOLUME 12 NOMOR 2 - SEPTEMBER: 181–187.
- Martosaputroa, Soeripno, 2014. Nila Murtia. Blowing the Wind Energi in Indonesia. *Energi Procedia* 47, 273–282
- Siregar, I.H., Effendy M., Rasyid A.H.A. 2018. Pengaruh Penambahan Free dan Fix Drag Reducing Pada Bilah terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius. *Otopro Volume 13 No. 2*. 63-66.
- Siregar, I.H., et al. *Effect fix drag-reducing on blades to performance of savonius wind turbine*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (456) 012066.
- Siregar, I.H., Effendy M., Rasyid A.H.A., Effect of the Number of Vanes in the Omnidirectional Guide Vane on Performance of Swirling Savonius Rotor, *International Journal of Advanced Science and Technology* Vol. 29, No. 03, (2020), pp. 12931 – 12938.
- Soeripno, Murti N. 2013. Wind hybrid power generation marketing development initiatives (WHyPGen). *Respects Magazine*. 1st ed. Vol. 3; p. 22-25.

Soeripno. 2009. *Wind energi technology development and utilization.* (Current status, barrier, opportunity in Indonesia). In: AUN/SEEDNet Regional Workshop on New/ Renewable Energi. Bandung.

<https://maps-indonesia.com/wind-map-indonesia>

## GLOSARIUM

**Aerodinamika** adalah cabang ilmu yang mempelajari aliran udara.

**Ekstrapolasi** adalah proses memperkirakan nilai suatu variabel melampaui interval pengamatan aslinya berdasarkan hubungannya dengan variabel lainnya.

**Fix drag reducer** adalah sebuah desain berupa plat berukuran  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  ditempatkan pada bilah yang berfungsi untuk mengurangi hambatan.

**Omnidirectional guide vanes** adalah peralatan tambahan berupa selubung yang melingkari model turbin angin dengan bilah yang mengarahkan aliran udara ketika menerpa bilah.

**Rotor** adalah benda yang berputar.

**Wind Resources Assessment** sebuah metode pengukuran kecepatan angin di suatu wilayah yang memerlukan data sekunder berupa klimatologi angin dalam skala meso dan data primer untuk skala mikro.

**Topografi** secara ilmiah artinya adalah studi tentang bentuk permukaan bumi dan objek lain seperti planet, satelit alami (bulan dan sebagainya), dan asteroid.

**Torsi** adalah momen gaya atau gaya dalam arah rotasi.

# INDEKS

## A

- Aerodinamika ..... 1, 71  
Aliranv, 2, 33, 38, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 59, 64, 65, 66, 67, 71  
Anemometer ..... 11, 13, 14  
Angin i, iii, iv, v, vi, vii, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71  
Darat ..... 1, 2  
Energi v, vi, 1, 2, 3, 4, 7, 8, 24, 69, 70, 75  
Fohn ..... 2  
Gunung ..... 2  
Laut ..... 1, 2  
Lembah ..... 2  
Muson ..... 2  
Pasat ..... 2  
Terowongan ..... 11, 12

## B

- Bilah v, vi, vii, 8, 9, 10, 15, 18, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36,

37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71

Bukaanvi, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31  
Busurvii, 20, 35, 52, 53, 57, 58, 59, 61, 63, 68

## C

Celahv, vi, vii, 18, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 51, 52, 53, 57, 59, 66, 68

## D

Data ..... 3, 4, 5, 6, 10, 71  
Pengukuran ..... 3, 4, 71  
Primer ..... 4, 71  
Satelit ..... 5, 6, 71  
Sekunder ..... 4, 71  
Daya 3, 4, 7, 8, 20, 21, 22, 23, 26, 28, 29, 30, 33, 36, 60, 61, 62, 63  
Angin i, iii, iv, v, vi, vii, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44

45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71	I
Turbin i, iii, iv, v, vi, vii, 3, 5, 7, 8, 9, 12, 14, 15, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71	Inverter.....11, 16
Deflektor .....	J
E	Jarakvii, 52, 53, 57, 64, 66, 68
Ekstrapolasi .....	K
F	Kipas.....11, 13, 16
Fix18, 20, 21, 22, 23, 69, 70, 71	Koefisien 8, 9, 10, 11, 21, 22, 23, 24, 26, 28, 30, 37, 38, 39, 54, 57, 59, 60, 61, 64, 68
Forces i, iii, iv, v, vi, vii, 7, 9, 18, 29, 30, 51, 52, 57, 68	Drag i, iii, iv, v, vi, vii, 7, 9, 10, 11, 18, 20, 21, 22, 23, 29, 30, 51, 52, 57, 68, 69, 70, 71
G	Kinerjavi, vii, 7, 8, 9, 20, 22, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 52, 53, 54, 57, 59, 60, 61, 63, 64, 67, 68, 69, 70
Gaya 9, 10, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 33, 36, 45, 71	Tekananvi, 1, 9, 10, 15, 34, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50
Dorong 20, 21, 22, 24, 25, 26	Torsiv, 8, 9, 10, 11, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 33, 36, 37, 41, 42, 45, 48, 55, 56, 61, 62, 64, 66, 67, 71
Normal .....	M
Tangensial.....10	Model v, vi, vii, 7, 9, 11, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50,
H	
Hambatan .....	
40, 71	

51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58,  
59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66,  
67, 68, 71

## N

Neraca ..... 12, 14

## P

Parameterv, vi, 7, 11, 19, 20,  
25, 34, 35, 53, 59

Puly ..... 12

## R

Rotor 11, 20, 35, 53, 57, 59, 71

## S

Sudut vi, vii, 10, 15, 18, 20, 21,  
22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29,  
30, 31, 34, 44, 45, 46, 47, 48,  
49, 50, 51, 52, 57, 58, 59, 61,  
63, 64, 68

Bukaanvi, 18, 20, 21, 22, 23,  
24, 25, 26, 27, 28, 29, 30,  
31

Busurvii, 20, 35, 52, 53, 57,  
58, 59, 61, 63, 68

*Swirling* ..... 11, 57

## T

Tekananvi, 1, 9, 10, 15, 34, 42,  
43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50  
Statik33, 43, 44, 46, 47, 48,  
49, 50, 56

Terowongan ..... 11, 12  
Torsi v, 8, 9, 10, 11, 21, 23,  
25, 26, 27, 30, 31, 33, 36,  
41, 42, 45, 48, 55, 56, 61,  
64, 66, 67, 71

## U

Udara1, 2, 7, 8, 9, 10, 31,  
33, 36, 38, 39, 40, 41, 53,  
64, 66, 71

## V

*Vane* ..... 35, 41, 42, 63

Variabel ..... 58, 71

## BIODATA PENULIS



**Dr. Mohammad Effendy, ST., MT.** Lahir di kota Jakarta tahun 1977, menyelesaikan pendidikan sarjana teknik kimia di ITS pada tahun 2001, lulus pascasarjana teknik kimia di ITB pada tahun 2008 dan Doktoral pada kampus yang sama pada tahun 2013. Pada tahun 2001 sampai 2005 menjadi tenaga pengajar di Teknik Kimia Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya. Pada tahun 2007 sampai 2010 menjadi karyawan PT. KONEBA. Tahun 2010 sampai 2012 menjadi karyawan PT. Energi Manajemen Indonesia dan Tahun 2016 sampai sekarang menjadi dosen di Teknik Mesin Universitas Negeri Surabaya. Adapun beberapa pengalaman Professional menjadi Consultant energi by project di PT. Trakon Industri 2012 sampai sekarang, di PT. TUV SUD Indonesia 2015 sampai 2018 dan sebagai Lead energy Auditor di PT. TUV Rheinlad untuk proyek audit energi di PT. HCML Indonesia tahun 2019 sampai 2020.



**Akhmad Hafiz Ainur Rasyid, S.T., M.T.** Lahir di Malang, 20 Maret 1988, menyelesaikan pendidikan sarjana teknik mesin bidang Produksi di Universitas Brawijaya pada tahun 2010 dan menyelesaikan pascasarjana teknik mesin bidang sistem manufaktur di ITS pada tahun 2013. Pada tahun 2014 sampai sekarang menjadi tenaga pengajar di Teknik Mesin Universitas Negeri Surabaya. Tahun 2019 sampai sekarang menjadi Assesor kompetensi di LSP UNESA.

# TURBIN ANGIN

SUMBU VERTIKAL  
BERBASIS  
DRAG FORCES



Indra Herlamba Siregar, S.T., M.T. lahir di Kota Medan tahun 1971. Menyelesaikan pendidikan D-1 Informatika di Politeknik Negeri Bandung tahun 1991. Lulus S-1 Teknik Mesin bidang Konversi Energi di ITS tahun 1997. Lulus Pascasarjana Teknik Mesin bidang Teknologi Energi di ITS tahun 2004. Tahun 1998 sampai 2005, menjadi tenaga pengajar di Teknik Mesin Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya. Tahun 2005, menjadi Trainer Pompa PT Indotrain. Pada tahun yang sama, menjadi konsultan di PT Bumi Siak Pusako, Pekanbaru. Tahun 2011, menjadi surveyor studi kelayakan pembangunan PLTMH di Sorong, Papua Barat. Tahun 2012, menjadi Technical Engineering Support PT (Persero) Sucofindo Pekanbaru untuk studi kelayakan pembangunan PLTBS (Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa Sawit) di PTPN V Pekanbaru. Tahun 2013, menjadi private consultant untuk owner PT Papua Energi Mandiri untuk proyek prastudi kelayakan pembangkit listrik tenaga uap 2 x 50 Mw. Tahun 2019, menjadi Tenaga Ahli PT TUV Rheinland Indonesia untuk proyek audit energi di PT HCML Indonesia. Tahun 2020, menjadi Lead Energy Auditor PT Karalis sistem untuk proyek audit energi gedung di PT Pertamina Hulu Kalimantan Timur. Tahun 2014 sampai sekarang, sebagai asesor pada BAN S/M. Tahun 2005 sampai sekarang, menjadi tenaga pengajar di Teknik Mesin Universitas Negeri Surabaya.



Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)  
Jl. Rajawali, Gang 11ang 6 No.3, Dranro, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman  
Jl. Kalurang Km 9,3 Yogyakarta 55581  
Telp/Fax : (0274) 4533427  
Anggota IKAPI (076/Div/2012)  
• cs@deepublish.co.id • @penerbitbuku\_deepublish  
• Penerbit Deepublish • www.penerbitbukudeepublish.com

Kategori : Teknik

ISBN 979-823-02-1794-4



9 786230 217944