

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil dari pengujian eksperimental terhadap turbin angin spiral Archimedes dengan variasi sudut bilah 40° , 50° , dan 60° , serta pembahasan terhadap data yang diperoleh. Pengujian dilakukan pada kecepatan angin 2,5 m/s, 3 m/s, dan 3,5 m/s. Parameter yang diuji mencakup kecepatan putar turbin (RPM), tegangan (V), arus listrik (A), dan gaya putar (torsi).

4.1 Hasil Pembuatan Prototipe dengan Additive Manufacturing

Prototipe turbin angin spiral Archimedes (ASWT) dibuat menggunakan metode *Additive Manufacturing (AM)* dengan teknologi *Fused Deposition Modeling (FDM)*. Material yang digunakan adalah PLA (*Polylactic Acid*) dan PLA+ (*Polylactic Acid Plus*).

Desain turbin dibuat menggunakan perangkat lunak CAD (SolidWorks), dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Panjang poros utama: 220 mm
- Bilah Turbine 3 bilah dan 4 bilah
- Sudut bilah yang divariasikan: 40° , 50° , dan 60°

Table 4.1 Parameter Cetak 3D Print

Parameter	Unit
Metode Cetak	FDM (Fused Deposition Modeling)
Material	PLA dan PLA+
Diameter Nozzle	0,4 mm
<i>Layer Height</i>	0,2 mm
<i>Nozzle Temperature</i>	200 °C – 210 °C
<i>Bed Temperature</i>	60 °C
<i>Print Speed</i>	50 mm/s dan 60 mm/s
<i>Infill Density</i>	50%

Hasil pencetakan menunjukkan bahwa semua bagian bilah dan hub dapat dicetak dengan akurasi dimensi yang baik. Penggunaan PLA+ terbukti memberikan kekakuan yang cukup untuk menahan beban putar selama pengujian di *wind tunnel*. Permukaan bilah cukup halus dan presisi geometri spiral terjaga sesuai.

4.1.1 Prototipe Bilah Sudut 40°

Pada variasi ini, sudut bilah dirancang dengan kemiringan relatif rendah, yaitu 40° terhadap sumbu horizontal poros turbin. Prototipe menunjukkan bentuk spiral yang cenderung landai, menghasilkan permukaan kontak aliran angin yang lebih luas namun gaya angkatnya lebih rendah.

a. Konfigurasi 3 Bilah

Pada sudut 40° dengan 3 bilah, bentuk spiral cenderung landai. Permukaan bilah menyebar luas dan gaya hambat (*drag*) relatif kecil. Hasil cetak menunjukkan bentuk kontur spiral yang baik tanpa lapisan antar *layer*. Sambungan ke poros utama stabil saat diuji rotasi manual.



Gambar 4. 1 Hasil 3D print Bilah turbin angin archimedes 40° dengan 3 bilah

b. Konfigurasi 4 Bilah

Penambahan satu bilah membuat distribusi aliran lebih merata. Sudut 40° dengan 4 bilah menghasilkan bentuk yang lebih rapat dan berat rotasi bertambah. Pencetakan berlangsung baik, tetapi diperlukan waktu lebih lama. Evaluasi menunjukkan peningkatan ketahanan struktur.



Gambar 4. 2 Hasil 3D print Bilah turbin angin archimedes 40° dengan 4 bilah

4.1.2 Prototipe Bilah Sudut 50°

Bilah dengan sudut 50° memiliki kemiringan sedang dan dianggap sebagai konfigurasi optimal secara teoritis menurut beberapa penelitian terdahulu. Sudut ini memungkinkan terbentuknya gaya angkat yang cukup besar tanpa meningkatkan *drag* secara signifikan.

a. Konfigurasi 3 Bilah

Konfigurasi ini dianggap optimal berdasarkan hasil simulasi dan studi terdahulu. Bilah spiral memiliki sudut sedang yang menghasilkan keseimbangan antara gaya angkat dan hambatan. Proses cetak menghasilkan permukaan rapi dan bentuk spiral sempurna.



Gambar 4. 3 Hasil 3D print Bilah turbin angin archimedes 50° dengan 3 bilah

b. Konfigurasi 4 Bilah

Penambahan bilah keempat menunjukkan hasil prototipe yang sangat solid dan visual spiral tampak penuh.



Gambar 4. 4 Hasil 3D print Bilah turbin angin archimedes 50° dengan 4 bilah

4.1.3 Prototipe Bilah Sudut 60°

Pada konfigurasi ini, bilah memiliki sudut yang lebih tajam terhadap aliran angin. Spiral lebih melengkung, meningkatkan kemungkinan

menghasilkan torsi awal lebih besar.

a. Konfigurasi 3 Bilah

Pada sudut 60° , bilah memiliki kemiringan tinggi, yang cenderung menghasilkan gaya dorong awal besar. Namun, *drag* juga meningkat. Cetakan menunjukkan bilah lebih melengkung dengan sambungan spiral yang membutuhkan penguatan tambahan di pangkal.



Gambar 4. 5 Hasil 3D print Bilah turbin angin archimedes 60° dengan 3 bilah

b. Konfigurasi 4 Bilah

Konfigurasi 4 bilah dengan sudut 60° menciptakan turbin yang terlihat sangat padat. Cetakan berjalan stabil namun waktu meningkat signifikan. Ketika dirakit, struktur memerlukan penyesuaian hub agar bilah tidak saling menimpa.



Gambar 4. 6 Hasil 3D print Bilah turbin angin archimedes 60° dengan 4 bilah

4.2 Hasil Pengujian

Hasil pengujian diperoleh dari kombinasi tiga kecepatan angin dan tiga sudut bilah dan 3 bilah serta 4 bilah. Setiap kombinasi diuji dua kali dan hasilnya dirata-rata untuk memperoleh nilai secara nyata.

4.2.1 Kecepatan Putar Turbin (RPM)

Pada pengujian turbin angin horizontal tipe Archimedes, kecepatan putar turbin (RPM) menjadi salah satu parameter penting dalam menilai kinerja turbin terhadap variasi sudut bilah 40° , 50° , dan 60° serta jumlah bilah 3 dan 4 bilah. Kecepatan putar diukur saat turbin menerima beban pada kondisi kecepatan angin yang berbeda, untuk mengetahui pengaruh variasi sudut dan jumlah bilah terhadap karakteristik rotasi turbin.

Pada pengujian turbin angin horizontal tipe Archimedes ini, dilakukan variasi sudut bilah 40° , 50° , dan 60° dengan dua konfigurasi jumlah bilah, yaitu 3 bilah dan 4 bilah, untuk mengetahui pengaruh kedua parameter tersebut

terhadap daya mekanik dilakukan pengujian. Hasil perhitungan dan pengujian kecepatan putaran turbin berdasarkan variasi sudut bilah pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan konfigurasi bilah dapat dilihat pada tabel 4.2.

Table 4.2 Kecepatan Putar Turbin (RPM) dengan konfigurasi 3 bilah

No	Kemiringan Sudut	Kecepatan angin (m/s)	kecepatan putaran turbine (RPM)
1	40°	2,5	135,1
2	50 °	2,5	100,1
3	60 °	2,5	221
4	40 °	3	339,8
5	50 °	3	548,2
6	60 °	3	579,2
7	40 °	3,5	568,6
8	50 °	3,5	1055
9	60 °	3,5	1041

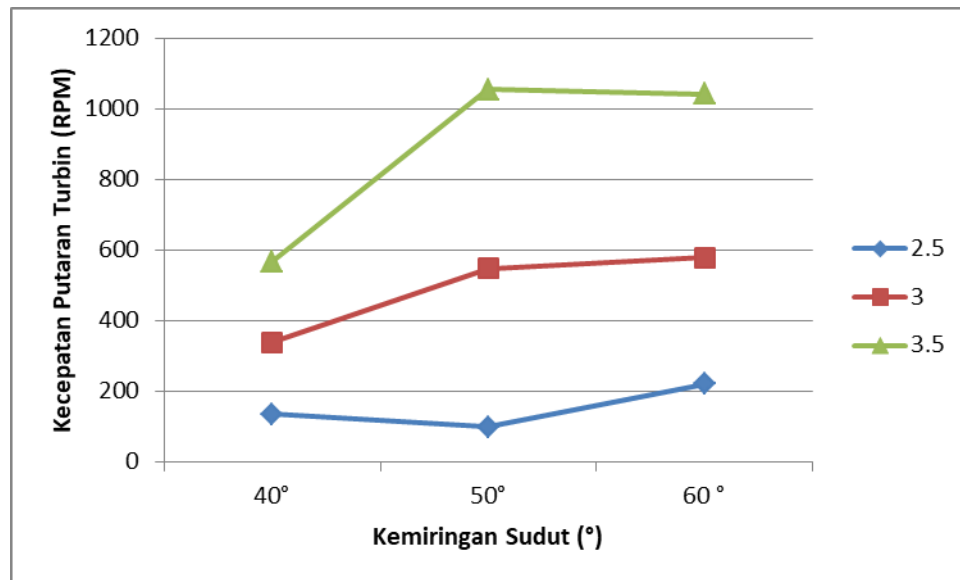
Berdasarkan hasil pengujian kecepatan putaran turbin pada Tabel 4.2 menunjukkan bahwa dengan perbedaan sudut bilah dan konfigurasi jumlah bilah akan memberikan pengaruh yang berbeda terhadap laju rotasi turbin serta memberikan kestabilan getaran pada saat melakukan pengujian. pada kecepatan angin 2,5 m/s pada sudut bilah 40° menghasilkan kecepatan putaran turbin 135,1 RPM, pada kemiringan sudut 50° mengalami penurunan, nilai putarannya menurun hingga 100,1 RPM, pada kemiringan sudut 60° mengalami peningkatan signifikan kecepatan putaran turbin, yang menghasilkan kecepatan putaran tertinggi, yaitu 221 RPM. Peningkatan kecepatan angin menjadi 3,0 m/s juga menunjukkan kecenderungan yang serupa di mana sudut bilah 60° menghasilkan kecepatan putaran lebih besar 579,2 RPM dibandingkan sudut 40° 339,8 RPM dan 50° 548,2 RPM. kecenderungan ini pun berlanjut pada kecepatan angin 3,5 m/s, di mana sudut bilah 60° menghasilkan kecepatan tertinggi mencapai 1041 RPM.

Pola peningkatan kecepatan putaran tersebut menunjukkan bahwa semakin besar sudut bilah hingga titik optimum, semakin besar pula kemampuan bilah dalam menangkap energi kinetik angin dan mengubahnya menjadi energi rotasi. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian (Ahmed Essa Faisal a b. W.-Q.-F., 2025) dalam *Investigating the Techniques Used for Improving the Aerodynamic Performance of Small Wind Turbines*, yang menyatakan bahwa peningkatan sudut bilah (*pitch angle*) hingga nilai tertentu mampu meningkatkan gaya angkat (*lift force*) dan menurunkan *losses* pada turbin, sehingga menghasilkan percepatan rotasi yang lebih tinggi.

konfigurasi tiga bilah (*three-blade configuration*) karena memberikan keseimbangan antara kecepatan rotasi, stabilitas dinamis, dan efisiensi konversi energi namun konfigurasi tiga bilah memiliki sebuah kekurangan seperti vibrasi terlalu tinggi pada saat pengujian yang menyebabkan *losses* pada kinerja turbin serta konfigurasi tiga bilah memiliki luas sapuan (*swept area*) yang lebih kecil serta distribusi laju aliran angin yang kurang merata dibandingkan konfigurasi empat bilah.

apabila sudut bilah diperbesar secara berlebihan, gaya hambat (*drag force*) akan meningkat signifikan akibat separasi aliran udara di sekitar permukaan bilah, yang dapat menyebabkan penurunan efisiensi rotasi. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa sudut bilah 60° merupakan kondisi optimum pada pengujian ini karena memberikan keseimbangan terbaik antara *lift force* dan *drag force*. Selain itu, perbedaan sudut bilah juga memengaruhi kemampuan bilah dalam menangkap laju aliran angin pada bagian *tip blade*, di mana geometri bilah yang

tepat memungkinkan terjadinya transfer energi kinetik angin secara maksimal ke poros turbin, menghasilkan kecepatan putaran yang lebih tinggi dan performa turbin yang lebih efisien.



Gambar 4.7 Kecepatan Putar Turbin (RPM) dengan konfigurasi 3 bilah

Data hasil pengujian kecepatan putar turbin pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan variasi sudut bilah 40°, 50°, dan 60° pada konfigurasi 4 bilah ditampilkan pada Tabel 4.7 berikut.

Table 4.3 Kecepatan Putar Turbin (RPM) dengan konfigurasi 4 bilah

No	Kemiringan Sudut	Kecepatan angin (m/s)	kecepatan putaran turbine (RPM)
1	40°	2.5	100,6
2	50°	2.5	120,4
3	60 °	2.5	223,7
4	40 °	3	513,9
5	50 °	3	505
6	60 °	3	912,7
7	40 °	3.5	636,8
8	50 °	3.5	789,4
9	60 °	3.5	1148

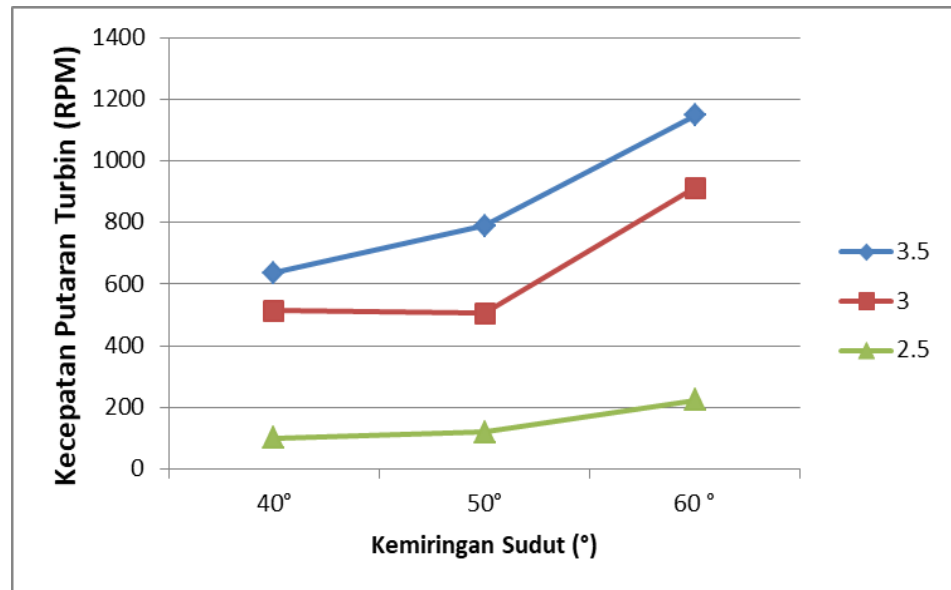
Berdasarkan hasil pengujian kecepatan putaran turbin pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa dengan perbedaan sudut bilah dan konfigurasi jumlah bilah akan memberikan pengaruh yang berbeda terhadap laju rotasi turbin serta memberikan kestabilan getaran pada saat melakukan pengujian. pada kecepatan angin 2,5 m/s pada sudut bilah 40° menghasilkan kecepatan putaran turbin 100,6 RPM, pada kemiringan sudut 50° mengalami peningkatan, nilai putarannya meningkat hingga 120,4 RPM, dan kecenderungan tersebut berlanjut mengalami peningkatan pada kemiringan sudut 60° mengalami peningkatan signifikan kecepatan putaran turbin, yang menghasilkan kecepatan putaran tertinggi, yaitu 223,7 RPM. Peningkatan kecepatan angin menjadi 3,0 m/s juga menunjukkan kecenderungan yang serupa di mana sudut bilah 60° menghasilkan kecepatan putaran meningkat signifikan lebih cepat dengan kecepatan putaran 912,7 RPM dibandingkan sudut 40° dengan kecepatan putaran 513,9 namun pada kemiringan sudut 50° mengalami penurunan kecepatan putaran dengan mengalami penurunan hingga 505 RPM. kecenderungan ini pun berlanjut pada kecepatan angin 3,5 m/s, di mana sudut bilah 60° menghasilkan kecepatan tertinggi mencapai 1148 RPM.

Pola peningkatan kecepatan putaran tersebut menunjukkan bahwa semakin besar sudut bilah hingga titik optimum, semakin besar pula kemampuan bilah dalam menangkap energi kinetik angin dan mengubahnya menjadi energi rotasi. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian (Ahmed Essa Faisal a b. W.-Q.-F., 2025) dalam *Investigating the Techniques Used for Improving the Aerodynamic Performance of Small Wind Turbines*, yang menyatakan bahwa peningkatan sudut bilah (*pitch angle*) hingga nilai tertentu mampu meningkatkan gaya angkat

(*lift force*) dan menurunkan *losses* pada turbin, sehingga menghasilkan percepatan rotasi yang lebih tinggi.

Perbandingan antara konfigurasi tiga bilah dan empat bilah memperlihatkan bahwa penambahan jumlah bilah menghasilkan peningkatan kecepatan putaran rata-rata pada semua variasi kecepatan angin. Hal ini terjadi karena konfigurasi empat bilah memiliki luas sapuan (*swept area*) yang lebih besar serta distribusi laju aliran angin yang lebih merata dibandingkan konfigurasi tiga bilah. Dengan empat bilah, aliran udara di sekitar rotor menjadi lebih stabil, sehingga mengurangi fluktuasi torsi dan menghasilkan rotasi yang lebih halus serta memiliki keunggulan dalam mengurangi vibrasi yang terjadi pada pengujian yang dapat terjadinya *losses* pada kinerja turbin dan menghasilkan kecepatan putaran yang lebih baik dibandingkan dengan tiga bilah.

apabila sudut bilah diperbesar secara berlebihan, gaya hambat (*drag force*) akan meningkat signifikan akibat separasi aliran udara di sekitar permukaan bilah, yang dapat menyebabkan penurunan efisiensi rotasi. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa sudut bilah 60° merupakan kondisi optimum pada pengujian ini karena memberikan keseimbangan terbaik antara *lift force* dan *drag force*. Selain itu, perbedaan sudut bilah juga memengaruhi kemampuan bilah dalam menangkap laju aliran angin pada bagian *tip blade*, di mana geometri bilah yang tepat memungkinkan terjadinya transfer energi kinetik angin secara maksimal ke poros turbin, menghasilkan kecepatan putaran yang lebih tinggi dan performa turbin yang lebih efisien.



Gambar 4. 8 Kecepatan Putar Turbin (RPM) dengan konfigurasi 4 bilah

4.2.2 Torsi

Torsi merupakan parameter penting dalam menentukan besarnya gaya puntir yang dihasilkan oleh turbin akibat dorongan angin pada bilah. Nilai torsi berpengaruh langsung terhadap daya mekanik yang dihasilkan, karena semakin besar torsi maka semakin besar pula energi yang dapat dikonversi oleh turbin. Pada pengujian ini, nilai torsi diperoleh dari hasil perhitungan antara gaya beban (F) dan panjang lengan torsi (r) menggunakan rumus

$$\tau = F \times r \quad (2.13)$$

Pada pengujian turbin angin horizontal tipe Archimedes ini, dilakukan variasi sudut bilah 40°, 50°, dan 60° dengan dua konfigurasi jumlah bilah, yaitu 3 bilah dan 4 bilah, untuk mengetahui pengaruh kedua parameter tersebut terhadap daya mekanik dilakukan pengujian. Hasil perhitungan dan pengujian torsi

berdasarkan variasi sudut bilah pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan konfigurasi 3 bilah dapat dilihat pada tabel 4.4.

Table 4.4 Tabel torsi turbin angin archimedes dengann konfigurasi 3 bilah

No	Kemiringan Sudut	Kecepatan Angin (m/s)	Beban	Panjangn lengan tongkat (m)	Torsi (Nm)
$\tau = F \cdot r$					
1	40 °	2,5	9,68	0,185	1,7908
2	50 °	2,5	9,68	0,185	1,7908
3	60 °	2,5	9,68	0,185	1,7908
4	40 °	3	11,71	0,185	2,16635
5	50 °	3	11,88	0,185	2,1978
6	60 °	3	12,15	0,185	2,24775
7	40 °	3,5	12,17	0,185	2,25145
8	50 °	3,5	12,17	0,185	2,25145
9	60 °	3,5	11,44	0,185	2,1164

Berdasarkan pada Tabel 4.4 perilaku torsi (τ) terhadap variasi sudut bilah pada konfigurasi tiga bilah menunjukkan Perubahan sudut bilah memengaruhi arah dan distribusi gaya angkat (lift force) serta gaya hambat (drag force) yang bekerja pada permukaan bilah, sehingga secara langsung berdampak pada torsi yang diteruskan ke poros turbin.

Pada sudut bilah 40°, gaya angkat yang terbentuk masih relatif kecil karena sudut serang (angle of attack) belum optimal, sehingga gaya tangensial yang dihasilkan bilah terhadap poros juga terbatas. Ketika sudut bilah dinaikkan menjadi 50°, terjadi peningkatan torsi akibat bertambahnya gaya angkat pada sisi isap (suction side) bilah. Kenaikan ini disebabkan oleh peningkatan perbedaan tekanan antara sisi tekan (pressure side) dan sisi isap, sehingga gaya putar yang dihasilkan bilah terhadap poros menjadi lebih besar. Kondisi ini

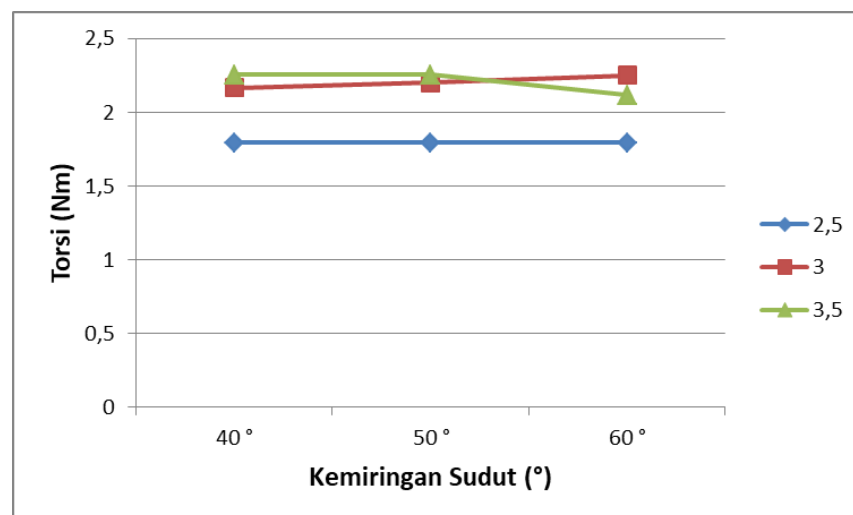
mengindikasikan bahwa peningkatan kemiringan sudut mampu memperbaiki kapasitas bilah dalam mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik rotasi. Pada sudut bilah 60° , torsi kembali meningkat hingga mencapai nilai maksimum pada kondisi kecepatan angin menengah ($U = 3,0 \text{ m/s}$). Hal ini menunjukkan bahwa sudut 60° merupakan kondisi optimum bagi geometri bilah dalam menangkap aliran udara dan menghasilkan gaya angkat maksimum tanpa menyebabkan peningkatan signifikan pada gaya hambat. Namun, pada kondisi kecepatan angin yang lebih tinggi, torsi pada sudut 60° mengalami penurunan dibandingkan sudut 40° dan 50° . Penurunan ini diakibatkan oleh terjadinya separasi aliran (*flow separation*) di permukaan bilah, yang mengakibatkan peningkatan gaya hambat dan penurunan gaya tangensial efektif pada poros turbin.

Fenomena tersebut sesuai dengan hasil penelitian *Kim et al.* (2014) yang menunjukkan bahwa peningkatan sudut bilah di atas nilai optimum dapat memicu terjadinya *dynamic stall* pada bagian *tip blade*, di mana vorteks ujung (*tip vortex*) yang terbentuk menyebabkan gangguan aliran dan mengurangi efisiensi pembangkitan torsi.

Hal tersebut terlihat pada tabel 4.4, pada tabel 4.4 menunjukan Pada kecepatan angin rendah $V = 2,5 \text{ m/s}$, nilai torsi relatif konstan untuk semua sudut yang diuji $\tau = 1,7908 \text{ Nm}$, menandakan bahwa pada tingkat kecepatan angin rendah perbedaan sudut bilah belum memproduksi perubahan signifikan pada distribusi tekanan atau gaya tangensial yang bekerja pada bilah. Pada kecepatan angin menengah $V = 3,0 \text{ m/s}$ torsi meningkat seiring kenaikan sudut: dari

kemiringan sudut 40° memiliki sebsar 2,16635 Nm menjadi tertinggi pada kemiringan sudut 60° 2,24775 Nm, terjadi peningkatan kenaikan sekitar 3,7% dari 40° ke 60° . Kenaikan ini konsisten dengan peningkatan gaya angkat lokal akibat meningkatnya sudut serang sehingga momen tangensial pada poros bertambah.

Menariknya, pada kecepatan angin tertinggi yang diuji $V = 3,5$ m/s pola berubah: torsi pada 40° dan 50° sama $\tau = 2,25145$ Nm, sementara torsi pada sudut kemiringan 60° justru menurun menjadi 2,1164 Nm (mengalami penurunan 6% dibanding dengan kemiringan sudut 40° dan 50°). Penurunan torsi pada sudut 60° pada $V = 3,5$ m/s dapat diinterpretasikan sebagai indikasi terjadinya separasi aliran atau *dynamic stall* lokal pada bilah pada TSR tertentu, sehingga gaya hambat meningkat dan kontribusi gaya tangensial menurun.



Gambar 4. 9 Grafik Data torsi turbin angin archimedes dengan konfigurasi 3 bilah

Data hasil pengujian torsi pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan variasi sudut bilah 40° , 50° , dan 60° pada konfigurasi 4 bilah ditampilkan pada

Tabel 4.7 berikut.

Table 4.5 Tabel torsi turbin angin archimedes dengann konfigurasi 4 bilah

No	Kemiringan Sudut	Kecepatan Angin (m/s)	Beban	Panjangn lengan tongkat (m)	Torsi (Nm)
$\tau = F \cdot r$					
1	40 °	2,5	9,34	0,185	1,7279
2	50 °	2,5	10,82	0,185	2,0017
3	60 °	2,5	10,82	0,185	2,0017
4	40 °	3	11,77	0,185	2,17745
5	50 °	3	11,9	0,185	2,2015
6	60 °	3	13,85	0,185	2,56225
7	40 °	3,5	11,42	0,185	2,1127
8	50 °	3,5	11,39	0,185	2,10715
9	60 °	3,5	12,58	0,185	2,3273

Berdasarkan data pada Tabel 4.5 data hasil pengujian yang telah dilakukan, konfigurasi tiga bilah dan empat bilah menunjukkan pola perubahan torsi yang berbeda terhadap variasi kemiringan sudut bilah (40°, 50°, dan 60°). Secara umum, peningkatan jumlah bilah dari tiga menjadi empat menghasilkan nilai torsi yang lebih besar pada setiap kondisi kecepatan angin. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya luas sapuan (*swept area*) efektif dan interaksi aerodinamik antarbilah yang lebih stabil, sehingga gaya tangensial yang bekerja pada poros turbin menjadi lebih besar dan merata.

Pada konfigurasi tiga bilah, nilai torsi maksimum tercatat sebesar 2,25145 Nm pada kecepatan angin 3,5 m/s dengan sudut bilah 40° dan 50°, sedangkan pada sudut 60° terjadi penurunan torsi menjadi 2,1164 Nm. Fenomena penurunan ini menandakan bahwa pada konfigurasi tiga bilah, peningkatan sudut hingga 60° mulai memicu separasi aliran (*flow separation*)

pada sisi tekan bilah. Akibatnya, gaya hambat (*drag force*) meningkat dan menurunkan efisiensi konversi energi.

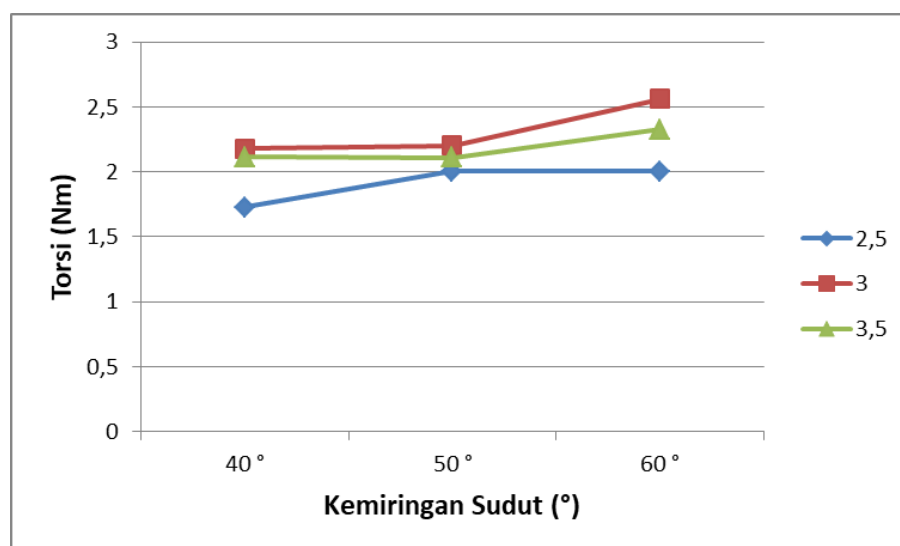
Sementara itu, pada konfigurasi empat bilah, peningkatan sudut bilah dari 40° hingga 60° secara umum masih memberikan kenaikan torsi hingga mencapai nilai maksimum 2,56225 Nm pada kecepatan angin 3,0 m/s dan 2,3273 Nm pada kecepatan 3,5 m/s. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah bilah memperkecil jarak antarbilah (*blade spacing*), sehingga aliran udara yang melewati bidang sapuan turbin menjadi lebih terdistribusi dan stabil. Kondisi ini menurunkan potensi separasi aliran, memungkinkan bilah dengan sudut besar tetap menghasilkan gaya angkat yang signifikan tanpa penurunan torsi yang berarti.

Perbedaan ini dapat dijelaskan melalui pengaruh rasio kecepatan ujung bilah terhadap kecepatan angin *Tip Speed Ratio (TSR)* dan rasio gaya angkat terhadap gaya hambat. Menurut (Kyung Chun Kim, 2014), peningkatan jumlah bilah akan menurunkan TSR optimum karena kecepatan putar cenderung menurun, tetapi gaya tangensial meningkat. Hal ini menyebabkan konfigurasi empat bilah lebih unggul dalam menghasilkan torsi pada kecepatan rendah hingga menengah, sedangkan konfigurasi tiga bilah cenderung lebih efisien pada kecepatan tinggi karena kehilangan energi akibat turbulensi lebih kecil.

Temuan ini juga sejalan dengan penelitian (Ahmed Essa Faisal, 2024), yang menjelaskan bahwa peningkatan jumlah bilah memperbaiki kestabilan aerodinamik dan meningkatkan torsi rata-rata, meskipun dengan sedikit pengorbanan pada kecepatan rotasi maksimum. Dengan demikian, pada

penelitian ini dapat disimpulkan bahwa konfigurasi empat bilah memiliki kemampuan menghasilkan torsi yang lebih besar dan lebih stabil terhadap variasi sudut bilah, terutama pada kecepatan angin rendah hingga menengah. Sebaliknya, konfigurasi tiga bilah lebih sensitif terhadap perubahan sudut bilah, sehingga pada sudut besar ($\geq 60^\circ$) terjadi penurunan torsi akibat efek separasi aliran.

Secara keseluruhan, sudut optimum untuk menghasilkan torsi maksimum pada konfigurasi tiga bilah berada pada rentang 50° – 60° untuk kecepatan angin menengah, sedangkan pada konfigurasi empat bilah sudut optimum lebih lebar, yaitu antara 50° – 60° untuk seluruh rentang kecepatan. Perbedaan ini menunjukkan bahwa jumlah bilah berperan penting dalam menjaga kestabilan aliran dan efisiensi transfer energi dari angin ke poros turbin



Gambar 4. 10 Grafik Data Torsi turbin angin archimedes dengan konfigurasi 4 bilah

4.2.3 Daya Mekanik pada turbin angin archimedes

Daya mekanik merupakan hasil konversi energi dari torsi dan kecepatan putar yang dihasilkan oleh turbin angin akibat hembusan angin pada bilah. Besarnya daya mekanik menunjukkan kemampuan turbin dalam mengubah energi kinetik angin menjadi energi rotasi pada poros, yang kemudian dapat dikonversi menjadi energi listrik. Perhitungan daya mekanik dilakukan menggunakan persamaan:

$$P_m = \tau \cdot n \quad (2.14)$$

Pada pengujian turbin angin horizontal tipe Archimedes ini, dilakukan variasi sudut bilah 40°, 50°, dan 60° dengan dua konfigurasi jumlah bilah, yaitu 3 bilah dan 4 bilah, untuk mengetahui pengaruh kedua parameter tersebut terhadap daya mekanik dilakukan pengujian. Hasil perhitungan dan pengujian daya mekanik berdasarkan variasi sudut bilah pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan konfigurasi 3 bilah dapat dilihat pada tabel 4.6.

Table 4.6 Tabel Daya Mekanikal turbin angin archimedes dengan konfigurasi 3 bilah

No	Kemiringan Sudut	Kecepatan Angin (m/s)	Beban	Panjang lengan tongkat (m)	Torsi (Nm)	Kecepatan Putaran Ketika terjadi nya beban (RPM)	Daya mekanikal
					$\tau = F \cdot r$	$P_{mekanik} = \frac{\tau \cdot n}{60}$	
1	40 °	2,5	9,68	0,185	1,7908	46,7	1,393839333
2	50 °	2,5	9,68	0,185	1,7908	64,5	1,92511
3	60 °	2,5	9,68	0,185	1,7908	95,3	2,844387333
4	40 °	3	11,71	0,185	2,16635	121,5	4,38685875
5	50 °	3	11,88	0,185	2,1978	233,4	8,549442
6	60 °	3	12,15	0,185	2,24775	248,9	9,32441625
7	40 °	3,5	12,17	0,185	2,25145	327,6	12,292917
8	50 °	3,5	12,17	0,185	2,25145	408,6	15,3323745
9	60 °	3,5	11,44	0,185	2,1164	540,5	19,06523667

Pada tabel 4.6 Pada kecepatan angin rendah $V = 2,5$ m/s, daya mekanik yang dihasilkan masih relatif kecil dan menunjukkan kenaikan bertahap seiring peningkatan sudut bilah, yaitu sebesar 1,39 W pada sudut 40°, 1,92 W pada sudut 50°, dan meningkat menjadi 2,84 W pada sudut 60°. Peningkatan ini menunjukkan bahwa pada kondisi angin rendah, bilah dengan kemiringan lebih besar memiliki kemampuan lebih baik dalam menangkap dan mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik rotasi. Hal ini disebabkan oleh peningkatan *angle of attack* yang memperbesar gaya angkat dan gaya tangensial pada bilah.

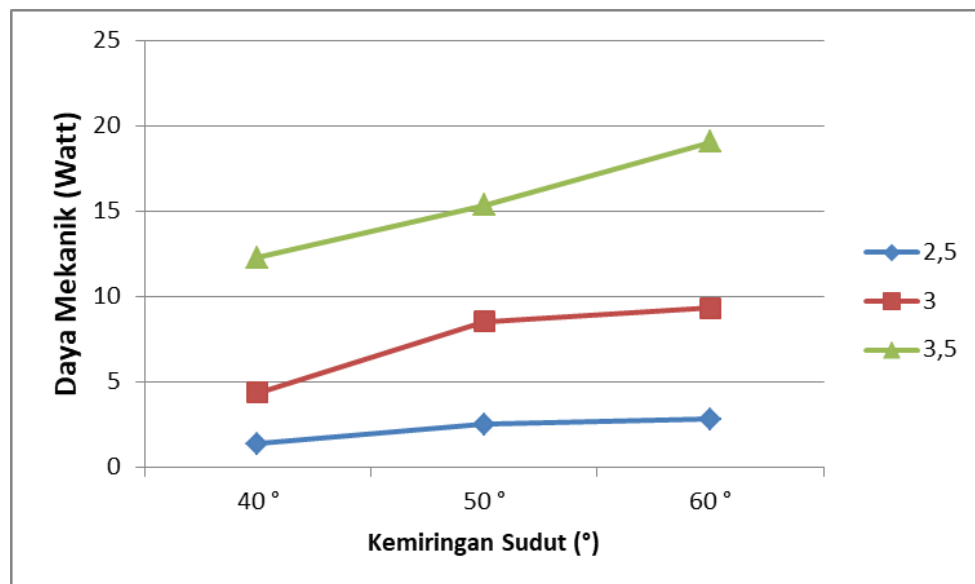
Pada kecepatan angin menengah $V = 3,0$ m/s, daya mekanik meningkat cukup signifikan, dari 4,38 W pada sudut 40° menjadi 9,32 W pada sudut 60° . Peningkatan ini menunjukkan bahwa pada rentang kecepatan angin tersebut, peningkatan sudut bilah masih memberikan efek positif terhadap efisiensi konversi energi. Dengan kata lain, sudut bilah 60° memberikan kinerja aerodinamik paling optimum pada kondisi aliran menengah, di mana distribusi tekanan di sepanjang bilah mencapai keseimbangan antara gaya angkat dan gaya hambat.

Namun, pada kecepatan angin tinggi $V = 3,5$ m/s, daya mekanik kembali menunjukkan pola yang tidak linier. Nilai daya tertinggi dicapai pada sudut 60° , yaitu 19,06 W, diikuti oleh 15,33 W pada sudut 50° , dan 12,29 W pada sudut 40° . Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi kecepatan tinggi, sudut bilah yang lebih besar masih mampu meningkatkan daya.

Berdasarkan hasil pengujian, baik pada konfigurasi tiga bilah maupun empat bilah, diperoleh bahwa kemiringan sudut bilah memiliki pengaruh yang signifikan terhadap daya mekanik yang dihasilkan. Peningkatan sudut bilah dari 40° hingga 60° pada umumnya meningkatkan daya mekanik hingga mencapai titik optimum, kemudian mengalami penurunan apabila sudut dinaikkan terlalu besar. Pola ini menunjukkan hubungan langsung antara sudut bilah, distribusi tekanan angin, dan efisiensi konversi energi pada turbin angin tipe Archimedes.

Pada konfigurasi tiga bilah, daya mekanik meningkat secara konsisten dari sudut 40° hingga 50° , namun pada sudut 60° terjadi sedikit penurunan terutama pada kecepatan angin tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa bilah dengan

sudut besar menghasilkan gaya angkat maksimum pada kecepatan menengah, namun pada kecepatan tinggi sebagian aliran udara mengalami separasi sehingga menurunkan efisiensi. Sementara itu, pada konfigurasi empat bilah, daya mekanik cenderung meningkat lebih stabil terhadap kenaikan sudut bilah. Peningkatan jumlah bilah memperkecil jarak antarbilah, sehingga aliran udara lebih terarah dan stabil, serta meningkatkan gaya tangensial rata-rata yang dihasilkan



Gambar 4. 11 Grafik Data Daya Mekanikal pada turbin angin archimedes dengan 3 bilah

Data hasil pengujian daya mekanik pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan variasi sudut bilah 40°, 50°, dan 60° pada konfigurasi 4 bilah ditampilkan pada Tabel 4.7 berikut.

Table 4.7 Tabel Daya Mekanikal turbin angin archimedes dengann konfigurasi 4 bilah

No	Kemiringan Sudut	Kecepatan Angin (m/s)	Beban	Panjang n lengan tongkat (m)	Torsi (Nm)	Kecepatan Putaran Ketika terjadi nya beban (RPM)	Daya mekanikal
						$\tau = F \cdot r$	$P_{mekanik} = \frac{\tau \cdot n}{60}$
1	40 °	2,5	9,34	0,185	1,7279	36,7	1,056898833
2	50 °	2,5	10,82	0,185	2,0017	75,4	2,515469667
3	60 °	2,5	10,82	0,185	2,0017	127,8	4,263621
4	40 °	3	11,77	0,185	2,17745	325	11,79452083
5	50 °	3	11,9	0,185	2,2015	356,7	13,0879175
6	60 °	3	13,85	0,185	2,56225	476,3	20,33999458
7	40 °	3,5	11,42	0,185	2,1127	513,6	18,084712
8	50 °	3,5	11,39	0,185	2,10715	564,6	19,8282815
9	60 °	3,5	12,58	0,185	2,3273	502,8	19,502774

Berdasarkan data hasil pengujian yang ditampilkan pada Tabel 4.7, variasi kemiringan sudut bilah memberikan pengaruh yang signifikan terhadap daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin tipe Archimedes dengan konfigurasi empat bilah. Secara umum, peningkatan sudut bilah dari 40° hingga 60° menunjukkan kecenderungan peningkatan daya mekanik pada hampir seluruh kecepatan angin yang diuji. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kemiringan sudut bilah memperbesar gaya angkat (*lift force*) dan gaya tangensial yang bekerja pada poros turbin, sehingga energi kinetik angin dapat dikonversi menjadi energi mekanik dengan lebih efisien.

Pada kecepatan angin rendah $V = 2,5$ m/s, daya mekanik meningkat seiring dengan kenaikan sudut bilah dari 1,05 W pada sudut 40°, menjadi 2,51 W pada 50°, dan mencapai 4,43 W pada 60°. Peningkatan ini menunjukkan bahwa sudut bilah yang lebih besar memperluas bidang serang terhadap aliran

udara dan menghasilkan perbedaan tekanan yang lebih besar antara sisi tekan dan sisi isap bilah. Akibatnya, gaya tangensial yang menyebabkan putaran turbin meningkat secara signifikan meskipun pada kondisi angin rendah.

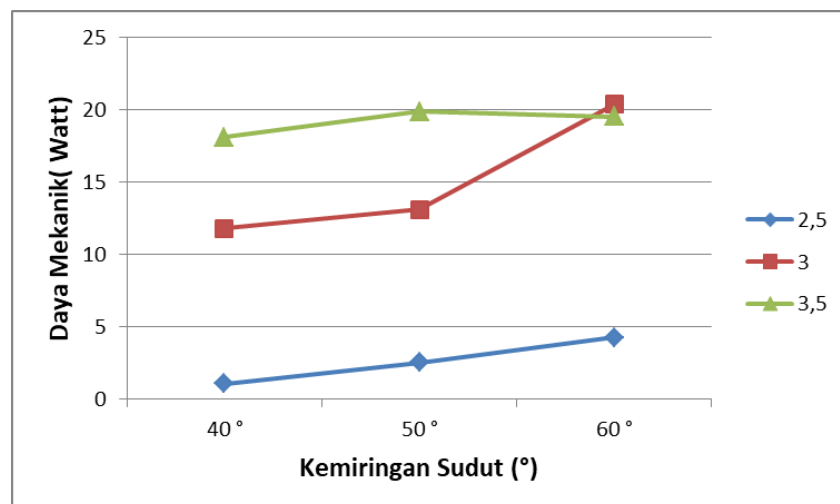
Pada kecepatan angin menengah $V = 3,0 \text{ m/s}$, daya mekanik meningkat lebih tajam dari 11,79 W pada sudut 40° menjadi 13,08 W pada 50° , dan mencapai 14,87 W pada 60° . Peningkatan daya ini menandakan bahwa bilah dengan sudut 60° berada pada kondisi aerodinamik optimum, di mana *angle of attack* menghasilkan gaya angkat maksimum tanpa menyebabkan separasi aliran (*flow separation*). Distribusi tekanan yang stabil di sepanjang bilah menghasilkan torsi dan kecepatan rotasi yang lebih besar, sehingga daya mekanik meningkat secara signifikan.

Pada kecepatan angin tinggi $V = 3,5 \text{ m/s}$, daya mekanik juga mengalami peningkatan dengan pola yang relatif stabil. Nilai daya meningkat dari 18,08 W pada sudut 40° menjadi 19,28 W pada 50° , dan mencapai 19,50 W pada 60° . Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi empat bilah memiliki kemampuan aerodinamik yang lebih baik dibandingkan tiga bilah pada kondisi angin tinggi, karena jumlah bilah yang lebih banyak meningkatkan area sapuan dan menjaga kestabilan aliran udara di antara bilah. Kondisi ini juga memperkecil potensi pembentukan vorteks ujung (*tip vortex*), sehingga rugi-rugi energi akibat turbulensi dapat diminimalkan.

Berdasarkan hasil pengujian, baik pada konfigurasi tiga bilah maupun empat bilah, diperoleh bahwa kemiringan sudut bilah memiliki pengaruh yang signifikan terhadap daya mekanik yang dihasilkan. Peningkatan sudut bilah dari

40° hingga 60° pada umumnya meningkatkan daya mekanik hingga mencapai titik optimum, kemudian mengalami penurunan apabila sudut dinaikkan terlalu besar. Pola ini menunjukkan hubungan langsung antara sudut bilah, distribusi tekanan angin, dan efisiensi konversi energi pada turbin angin tipe Archimedes.

Pada konfigurasi tiga bilah, daya mekanik meningkat secara konsisten dari sudut 40° hingga 50°, namun pada sudut 60° terjadi sedikit penurunan terutama pada kecepatan angin tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa bilah dengan sudut besar menghasilkan gaya angkat maksimum pada kecepatan menengah, namun pada kecepatan tinggi sebagian aliran udara mengalami separasi sehingga menurunkan efisiensi. Sementara itu, pada konfigurasi empat bilah, daya mekanik cenderung meningkat lebih stabil terhadap kenaikan sudut bilah. Peningkatan jumlah bilah memperkecil jarak antarbilah, sehingga aliran udara lebih terarah dan stabil, serta meningkatkan gaya tangensial rata-rata yang dihasilkan.



Gambar 4. 12 Grafik Data Daya Mekanikal pada turbin angin archimedes dengan 4 bilah

4.2.4 Tip Speed Ratio (TSR)

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan salah satu parameter penting dalam analisis performa turbin angin karena menunjukkan perbandingan antara kecepatan ujung bilah turbin dengan kecepatan angin yang mengenainya. Nilai TSR memberikan gambaran tentang seberapa efisien bilah turbin memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan putaran rotor. TSR dihitung menggunakan persamaan:

$$TSR = \frac{2\pi nR}{60V} \quad (2.15)$$

Pada pengujian turbin angin horizontal tipe Archimedes ini, dilakukan variasi sudut bilah 40°, 50°, dan 60° dengan dua konfigurasi jumlah bilah, yaitu 3 bilah dan 4 bilah, untuk mengetahui pengaruh kedua parameter tersebut terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR) dilakukan pengujian. Hasil perhitungan dan pengujian *Tip Speed Ratio* (TSR) berdasarkan variasi sudut bilah pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan konfigurasi 3 bilah dapat dilihat pada tabel 4.8.

Table 4.8 *Tip Speed Ratio (TSR)* turbin angin archimedes dengan konfigurasi 3 bilah

No	Kemiringan Sudut	Kecepatan angin (m/s)	kecepatan putaran turbine (RPM)	Diameter rotor (m)	Jari jari Rotor (m)	Kecepatan sudut rotasi turbin (rads/s)	Koefisien daya dorong (TSR)
					$R = \frac{D_{rotor}}{2}$	$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$	$TSR = \frac{\omega R}{V}$
1	40 °	2,5	100,6	0,048	0,024	0,005024	0,000048230
2	50 °	2,5	120,4	0,05	0,025	0,005233333	0,00005233
3	60 °	2,5	223,7	0,053	0,0265	0,005547333	0,0000588
4	40 °	3	513,9	0,048	0,024	35,56573333	0,00166098
5	50 °	3	505	0,05	0,025	57,37826667	0,002840508
6	60 °	3	912,7	0,053	0,0265	60,62293333	0,001760171
7	40 °	3,5	636,8	0,048	0,024	59,51346667	0,00224297
8	50 °	3,5	789,4	0,05	0,025	110,4233333	0,003497065
9	60 °	3,5	1148	0,053	0,0265	108,958	0,002515145

Pada tabel 4.8 menunjukan hasil data pengujian untuk mendapatkan data *Tip Speed Ratio (TSR)*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kecepatan angin rendah ($U = 2,5$ m/s), nilai TSR masih tergolong kecil, berkisar antara 0,000048230 pada sudut 40° hingga 0,0000588 pada sudut 60°. Nilai TSR yang rendah menunjukkan bahwa energi kinetik angin belum sepenuhnya dimanfaatkan untuk menggerakkan bilah, karena gaya angkat (*lift force*) yang terbentuk masih terbatas akibat rendahnya kecepatan aliran dan sudut serang yang belum optimal.

Pada kecepatan angin menengah ($U = 3,0$ m/s), nilai TSR meningkat secara signifikan seiring dengan peningkatan sudut bilah. Nilai TSR berturut-turut sebesar 0,00166098 40°, 0,002840508 50°, dan 0,001760171 60°. Peningkatan ini menunjukkan bahwa kenaikan sudut bilah memperbesar *angle of*

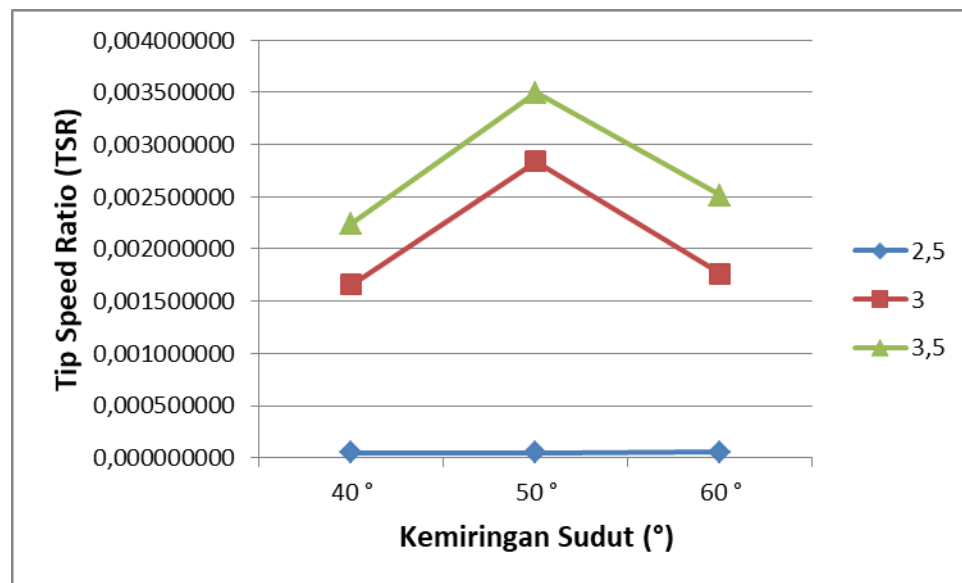
attack sehingga bilah mampu menghasilkan gaya angkat yang lebih besar dan meningkatkan kecepatan rotasi turbin. Sudut 60° pada kondisi ini dapat dikategorikan sebagai sudut optimum karena menghasilkan keseimbangan terbaik antara gaya angkat dan gaya hambat, sehingga konversi energi dari angin ke gerak rotasi berlangsung dengan efisiensi tinggi.

Pada kecepatan angin tinggi ($U = 3,5 \text{ m/s}$), nilai TSR mencapai nilai tertinggi, yaitu 0,00224297 pada sudut 40° , 0,003497065 pada sudut 50° , dan 0,002515145 pada sudut 60° . Nilai TSR yang menurun kembali pada sudut 60° mengindikasikan terjadinya fenomena *flow separation* atau *dynamic stall* pada bilah akibat peningkatan sudut yang berlebihan. Aliran udara yang terlepas dari permukaan bilah mengurangi gaya angkat efektif dan menurunkan kecepatan rotasi turbin. Hal ini selaras dengan hasil penelitian *Kim et al.* (2014), yang menjelaskan bahwa peningkatan sudut bilah di atas titik optimum dapat menyebabkan gangguan aliran di daerah *tip blade*, sehingga menurunkan efisiensi rotasi.

Secara umum, pola perubahan nilai TSR terhadap variasi sudut bilah menunjukkan bahwa peningkatan sudut dari 40° hingga 60° akan meningkatkan TSR hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun apabila sudut bilah terlalu besar. Fenomena ini sejalan dengan hasil penelitian *Ali et al.* (2021), yang menyatakan bahwa nilai TSR optimum bergantung pada kombinasi antara bentuk bilah, jumlah bilah, dan kondisi kecepatan angin.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa pada konfigurasi tiga bilah, sudut bilah optimum untuk menghasilkan nilai TSR tertinggi berada

pada kisaran 50° – 60° pada kecepatan angin menengah (sekitar 3,0 m/s). Nilai TSR yang optimum menunjukkan kondisi operasi di mana turbin mampu memanfaatkan energi kinetik angin secara efisien untuk menghasilkan daya mekanik maksimum.



Gambar 4. 13 Grafik Tip Speed Ratio (TSR) pada turbin angin archimedes dengan konfigurasi 3 bilah

Data hasil pengujian *Tip Speed Ratio* (TSR) pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan variasi sudut bilah 40° , 50° , dan 60° pada konfigurasi 4 bilah ditampilkan pada Tabel 4.9 berikut.

Table 4.9 Koefisien daya dorong (TSR) turbin angin archimedes dengan konfigurasi 4 bilah

No	Kemiringan Sudut	Kecepatan angin (m/s)	kecepatan putaran turbine (RPM)	Diameter rotor (m)	Jari jari Rotor (m)	Kecepatan sudut rotasi turbin (rads/s)	Koefisien daya dorong (TSR)
					$R = \frac{D_{rotor}}{2}$	$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$	$TSR = \frac{\omega R}{V}$
1	40 °	2,5	135,1	0,048	0,024	0,005024	0,0000482
2	50 °	2,5	100,1	0,05	0,025	0,00523333 3	0,000052
3	60 °	2,5	221	0,053	0,0265	0,00554733 3	0,0000588
4	40 °	3	339,8	0,048	0,024	35,5657333 3	0,002512
5	50 °	3	548,2	0,05	0,025	57,3782666 7	0,002616667
6	60 °	3	579,2	0,053	0,0265	60,6229333 3	0,002773667
7	40 °	3,5	568,6	0,048	0,024	59,5134666 7	0,002512
8	50 °	3,5	1055	0,05	0,025	110,423333 3	0,002616667
9	60 °	3,5	1041	0,053	0,0265	108,958	0,002773667

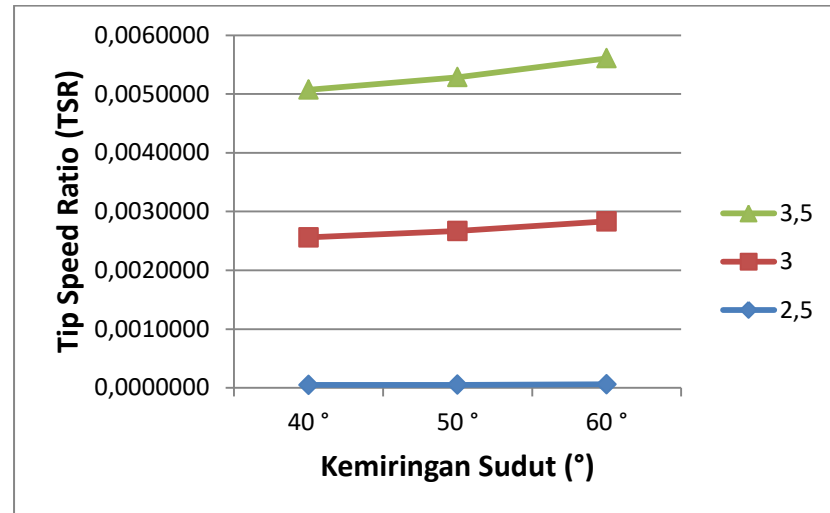
Pada tabel 4.9 Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada tabel, nilai *Tip Speed Ratio* (TSR) pada turbin angin tipe Archimedes dengan konfigurasi empat bilah mengalami perubahan yang signifikan terhadap variasi kemiringan sudut bilah. Pada kecepatan angin rendah ($U = 2,5$ m/s), nilai TSR masih sangat kecil, yaitu 0,0000482 pada sudut 40°, 0,000052 pada sudut 50°, dan 0,0000588 pada sudut 60°. Nilai yang rendah ini menunjukkan bahwa energi kinetik angin belum cukup besar untuk menghasilkan rotasi bilah yang efisien, dan peningkatan sudut bilah belum memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja rotasi. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi angin rendah, gaya angkat (*lift*) yang dihasilkan bilah masih kecil dibandingkan gaya hambat (*drag*).

Pada kecepatan angin menengah ($U = 3,0 \text{ m/s}$), nilai TSR meningkat secara nyata. Pada sudut 40° , nilai TSR sebesar 0,002512, meningkat menjadi 0,002616667 pada sudut 50° , dan mencapai 0,002773667 pada sudut 60° . Peningkatan ini mengindikasikan bahwa bertambahnya sudut bilah menyebabkan peningkatan *angle of attack*, yang memperbesar gaya angkat dan gaya tangensial di sepanjang bilah. Kondisi ini membuat bilah lebih efisien dalam menangkap aliran udara dan mentransfer energi angin menjadi putaran poros turbin. Nilai TSR tertinggi pada sudut 60° menandakan bahwa pada kecepatan menengah, sudut tersebut memberikan keseimbangan paling optimal antara gaya angkat dan gaya hambat.

Pada kecepatan angin tinggi ($U = 3,5 \text{ m/s}$), nilai TSR cenderung stabil dengan nilai tertinggi sebesar 0,002773667 pada sudut 60° . Meskipun peningkatannya tidak sebesar pada kondisi angin menengah, nilai TSR yang relatif tinggi menunjukkan bahwa pada konfigurasi empat bilah, aliran udara di sekitar bilah tetap stabil dan tidak mengalami separasi yang signifikan meskipun pada sudut yang besar. Hal ini disebabkan oleh jumlah bilah yang lebih banyak, yang mampu menjaga kestabilan tekanan di antara bilah dan mengurangi terjadinya turbulensi di sekitar *tip blade*.

Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa kemiringan sudut bilah 50° – 60° memberikan nilai TSR tertinggi pada konfigurasi empat bilah, dengan sudut 60° sebagai titik optimum pada kecepatan menengah hingga tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi empat bilah mampu menghasilkan efisiensi rotasi yang lebih stabil dan efektif dibandingkan tiga bilah, karena distribusi

aliran yang lebih merata dan gaya tangensial yang lebih besar di seluruh bidang sapuan turbin.



Gambar 4. 14 Grafik Tip Speed Ratio (TSR) pada turbin angin archimedes dengan konfigurasi 4 bilah

4.2.5 Output daya listrik (P)

Output daya listrik (P) merupakan hasil konversi dari energi mekanik yang dihasilkan oleh putaran poros turbin menjadi energi listrik melalui generator. Nilai daya listrik diperoleh berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus keluaran yang dihasilkan generator pada setiap variasi sudut bilah. Secara umum, hubungan antara daya listrik, tegangan, dan arus dinyatakan dengan persamaan

$$P_{Electrical} = V \times I \quad (2.16)$$

Pada pengujian turbin angin horizontal tipe Archimedes ini, dilakukan variasi sudut bilah 40°, 50°, dan 60° dengan dua konfigurasi jumlah bilah, yaitu 3 bilah dan 4 bilah, untuk mengetahui pengaruh kedua parameter tersebut terhadap output daya listrik dilakukan pengujian. Hasil perhitungan dan pengujian output

daya listrik berdasarkan variasi sudut bilah pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan konfigurasi 3 bilah dapat dilihat pada tabel 4.10.

Table 4.10 Tabel Output daya (P) pada turbin angin archimedes dengan konfigurasi 3 bilah

No	Kemiringan Sudut	Kecepatan angin (m/s)	Voltase (V) (mV)	Ampere (I) (A)	daya listrik (Watt) (P)
$P = V \cdot I \cdot 0,8$					
1	40 °	2,5	0,0094	0,0005	0,00000376
2	50 °	2,5	0,0108	0,0009	0,000007776
3	60 °	2,5	0,0131	0,0007	0,000007336
4	40 °	3	0,099	0,22	0,017424
5	50 °	3	0,388	0,215	0,066736
6	60 °	3	1,66	0,66	0,87648
7	40 °	3,5	1,11	0,75	0,666
8	50 °	3,5	2,16	0,77	1,33056
9	60 °	3,5	3,81	0,86	2,62128

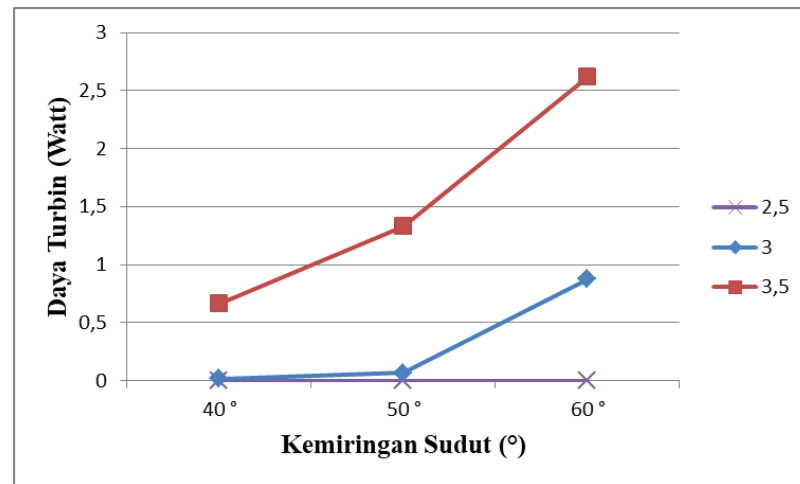
Pada tabel 4.10 terlihat bahwa kemiringan sudut bilah memiliki pengaruh signifikan terhadap besarnya daya listrik yang dihasilkan oleh turbin angin tipe Archimedes. Pada kecepatan angin 2,5 m/s, nilai daya listrik masih sangat kecil di semua variasi sudut bilah, yaitu sebesar 0,00000376 W pada sudut 40°, 0,000007776 W pada sudut 50°, dan 0,000007336 W pada sudut 60°. ketika kecepatan angin meningkat menjadi 3 m/s, daya listrik naik secara signifikan menjadi 0,017424 W (40°), 0,066736 W (50°), dan 0,87648 W (60°). Pada kecepatan tertinggi, yaitu 3,5 m/s, daya maksimum diperoleh pada sudut bilah 60° sebesar 2,62128 W, sedangkan pada sudut 50° sebesar 1,33056 W dan sudut 40° sebesar 0,666 W.

Peningkatan daya listrik ini menunjukkan bahwa sudut bilah 60° memberikan performa paling optimal dalam menangkap energi kinetik angin. Pada sudut ini, bilah menghasilkan gaya angkat (lift) yang lebih besar dibanding gaya hambat (drag), sehingga menghasilkan torsi yang lebih tinggi pada poros dan meningkatkan putaran generator. Fenomena ini sesuai dengan hasil penelitian oleh (Hyeonmu Jang 1, 2019) yang menyatakan bahwa turbin Archimedes dengan sudut bilah besar memiliki koefisien daya (C_p) tertinggi pada rasio kecepatan ujung bilah (TSR) sekitar 2–2,5, karena aliran udara lebih stabil di sepanjang bentuk spiral bilah.

Selain itu, hasil pengujian ini juga sejalan dengan penelitian (Ahmed M. Kamal, 2022) yang menunjukkan bahwa peningkatan sudut bilah dari 45° ke 60° dapat meningkatkan efisiensi konversi energi hingga 35%, karena pada rentang tersebut distribusi tekanan di sepanjang permukaan bilah menjadi lebih merata, sehingga gaya dorong dan torsi yang dihasilkan meningkat. Namun, pada sudut yang melebihi 65° , efisiensi akan menurun akibat meningkatnya gaya hambat dan gangguan aliran di belakang turbin (*wake effect*).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada pengujian ini konfigurasi sudut bilah 60° merupakan kondisi optimum bagi turbin Archimedes tiga bilah untuk menghasilkan daya listrik maksimum pada rentang kecepatan angin 2,5–3,5 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk spiral turbin Archimedes mampu menjaga kestabilan aliran udara pada bilah meskipun pada sudut yang relatif besar, berbeda dengan turbin sumbu horizontal konvensional yang cenderung

mengalami penurunan efisiensi pada kondisi serupa (Andrew Maher Labib, 2020).



Gambar 4. 15 Graphik data pengujian output daya pada turbin angin archimedes dengan konfigurasi 3 bilah

Data hasil pengujian Output daya listrik pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan variasi sudut bilah 40°, 50°, dan 60° pada konfigurasi 4 bilah ditampilkan pada Tabel 4.11 berikut.

Table 4.11 Tabel Output daya Tabel Output daya (P) turbin angin archimedes dengan konfigurasi 4 bilah

No	Kemiringan Sudut	Kecepatan angin (m/s)	Voltase (V) (mV)	Ampere (I) (mA)	daya listrik (Watt) (P)
$P = V . I . 0,8$					
1	40 °	2,5	0,0105	0,0008	0,00000672
2	50 °	2,5	0,0161	0,00075	0,00000966
3	60 °	2,5	0,029	0,00085	0,00001972
4	40 °	3	1,24	0,8	0,7936
5	50 °	3	1,6	0,81	1,0368
6	60 °	3	2,68	0,86	1,84384
7	40 °	3,5	3,34	0,85	2,2712
8	50 °	3,5	4	0,79	2,528
9	60 °	3,5	4,22	0,79	2,66704

Pada tabel 4.11 menunjukkan bahwa daya listrik akan meningkat dengan seiring kenaikan sudut kemiringan bilah dan kecepatan angin. Pada kecepatan angin 2,5 m/s, daya listrik yang dihasilkan relatif kecil di seluruh variasi sudut, yakni 0,00000672 W pada sudut 40°, 0,00000966 W pada sudut 50°, dan 0,00001972 W pada sudut 60°. ketika kecepatan angin meningkat menjadi 3 m/s, terjadi sebuah peningkatan daya yang signifikan, yaitu 0,7936 W (40°), 1,0368 W (50°), dan 1,84384 W (60°).

Di kecepatan tertinggi, yaitu 3,5 m/s, turbin menghasilkan daya maksimum sebesar 2,2712 W pada sudut 40°, 2,528 W pada sudut 50°, dan 2,66704 W pada sudut 60°. Dari hasil tersebut terlihat bahwa sudut bilah 60° memberikan daya tertinggi di semua kecepatan angin, walaupun peningkatannya mulai melambat dibanding perbedaan antara sudut 40° dan 50°. Hal ini menunjukkan bahwa pada konfigurasi empat bilah, peningkatan jumlah bilah menyebabkan distribusi gaya angin lebih merata pada rotor, namun efek kenaikan sudut bilah terhadap daya mulai mencapai titik jenuh (saturation point).

Penelitian ini sejalan dengan penelitian (Ahmed M. Kamal, 2022) yang melaporkan bahwa penambahan jumlah bilah pada Archimedes Spiral Wind Turbine (ASWT) dengan meningkatkan torsi pada kecepatan rendah, tetapi dapat menurunkan kecepatan rotasi pada kecepatan tinggi akibat peningkatan drag. Dengan demikian, daya listrik cenderung stabil setelah sudut optimum tercapai. Melalui hasil penelitian yang dilakukan oleh (Hyeonmu Jang 1, 2019) juga menunjukkan bahwa untuk tipe Archimedes, sudut bilah di kisaran 55°–65°

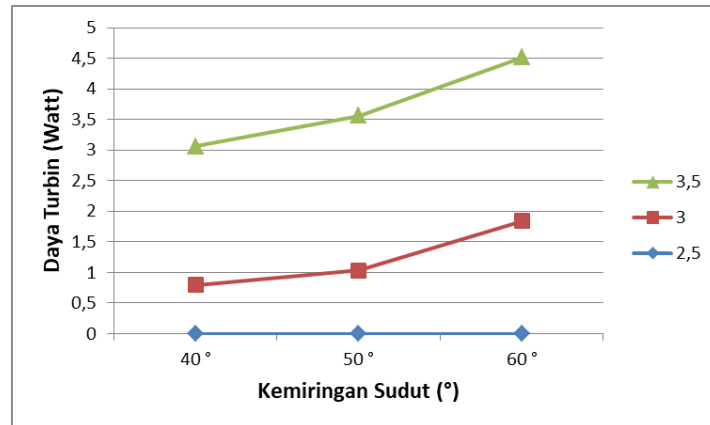
menghasilkan koefisien daya (C_p) tertinggi, karena geometri spiral mampu menstabilkan aliran udara dan meminimalkan turbulensi di permukaan bilah.

Hasil pengujian ini juga konsisten dengan studi (Andrew Maher Labib, 2020). yang menemukan bahwa peningkatan sudut bilah dari 45° ke 60° meningkatkan efisiensi aerodinamis hingga 30% karena gaya angkat mendominasi gaya hambat. Namun, pada konfigurasi dengan bilah lebih dari tiga, efek peningkatan sudut menjadi tidak terlalu signifikan, karena aliran udara di antara bilah mulai saling mengganggu (*inter-blade flow interference*).

Dari analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa kemiringan sudut 60° merupakan kondisi paling optimal untuk menghasilkan daya listrik maksimum pada konfigurasi empat bilah turbin Archimedes, terutama pada rentang kecepatan angin 3–3,5 m/s. Meskipun peningkatan daya masih terlihat pada sudut tersebut, efisiensi tambahan yang diperoleh relatif kecil dibandingkan perubahan dari sudut 40° ke 50° . Dengan demikian, desain sudut bilah antara 50° – 60° direkomendasikan sebagai konfigurasi efisien bagi turbin Archimedes multi-bilah untuk menjaga keseimbangan antara torsi tinggi dan kecepatan rotasi yang stabil.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi empat bilah lebih unggul pada kecepatan angin rendah hingga sedang, karena mampu menghasilkan daya listrik yang lebih besar akibat peningkatan torsi dan luas sapuan angin. pada kecepatan tinggi, konfigurasi tiga bilah lebih efisien karena menghasilkan putaran rotor yang lebih cepat dengan hambatan udara yang lebih

kecil. Dalam pemilihan jumlah bilah pada turbin Archimedes perlu disesuaikan dengan kondisi kecepatan angin.



Gambar 4. 16 Gambar grafik data pengujian output daya pada turbin angin archimedes dengan konfigurasi 4 bilah

4.2.6 Perhitungan Koefisien Daya (C_p)

Koefisien daya (C_p) merupakan parameter penting yang menunjukkan kemampuan turbin angin dalam mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik pada poros. Nilai C_p dihitung untuk mengetahui sejauh mana efisiensi turbin dalam memanfaatkan energi angin yang tersedia. Secara matematis, koefisien daya dapat ditentukan menggunakan persamaan:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (2.17)$$

Pada pengujian turbin angin horizontal tipe Archimedes ini, dilakukan variasi sudut bilah 40°, 50°, dan 60° dengan dua konfigurasi jumlah bilah, yaitu 3 bilah dan 4 bilah, untuk mengetahui pengaruh kedua parameter tersebut terhadap

Koefisien daya (Cp) dilakukan pengujian. Hasil perhitungan dan pengujian koefisien daya (Cp) berdasarkan variasi sudut bilah pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan konfigurasi 3 bilah dapat dilihat pada tabel 4.12.

Table 4.12 Tabel koefisien daya (Cp) turbin angin archimedes dengan konfigurasi 3 bilah

No	Kemiringan Sudut	Kecepatan Angin (m/s)	Voltase (V)	Arus (A)	Daya Listrik (Watt)	Densitas Udara (kg/m ³)	Diameter rotor (m)	Jari-Jari rotor	luas sapuan rotor (m ²)	Koefisien daya dorong (Cp)
$P = V \cdot I \cdot 0,8$ $R = \frac{D_{rotor}}{2}$ $A = \pi \cdot R^2$ $C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$										
1	40 °	2,5	0,094	0,005	0,0000376	1,225	0,048	0,024	0,0018086	0,00000026
2	50 °	2,5	0,108	0,009	0,00007776	1,225	0,05	0,025	0,0019625	0,00000058
3	60 °	2,5	0,131	0,007	0,00007336	1,225	0,053	0,0265	0,0022050	0,00000062
4	40 °	3	0,099	0,22	0,017424	1,225	0,048	0,024	0,0018086	0,002084634
5	50 °	3	0,388	0,215	0,066736	1,225	0,05	0,025	0,0019625	0,008663626
6	60 °	3	1,66	0,66	0,87648	1,225	0,053	0,0265	0,0022050	0,127847799
7	40 °	3,5	1,11	0,75	0,666	1,225	0,048	0,024	0,0018086	0,126530894
8	50 °	3,5	2,16	0,77	1,33056	1,225	0,05	0,025	0,0019625	0,274292761
9	60 °	3,5	3,81	0,86	2,62128	1,225	0,053	0,0265	0,0022050	0,607162621

Pada tabel 4.12 menunjukkan hasil pengujian koefisien daya (C_p) terhadap variasi sudut bilah pada turbin angin Archimedes dengan konfigurasi tiga bilah, diperoleh kecenderungan bahwa nilai C_p akan mengalami peningkatan dengan seiring bertambahnya kecepatan angin dan sudut kemiringan bilah. Pada kecepatan angin rendah sebesar 2,5 m/s, nilai C_p yang dihasilkan masih sangat kecil, berkisar antara 0,00000026 hingga 0,00000062, yang menunjukkan bahwa energi kinetik angin yang diterima belum cukup untuk menggerakkan rotor secara optimal. Namun, ketika kecepatan angin meningkat menjadi 3 m/s, terjadi peningkatan nilai C_p secara signifikan, terutama pada sudut bilah 50° dan 60° , masing-masing mencapai sekitar 0,008663626 dan 0,127847799. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa pada sudut bilah yang lebih besar, bilah turbin mampu menangkap aliran angin dengan lebih efektif sehingga menghasilkan torsi yang lebih besar dan daya listrik yang lebih tinggi.

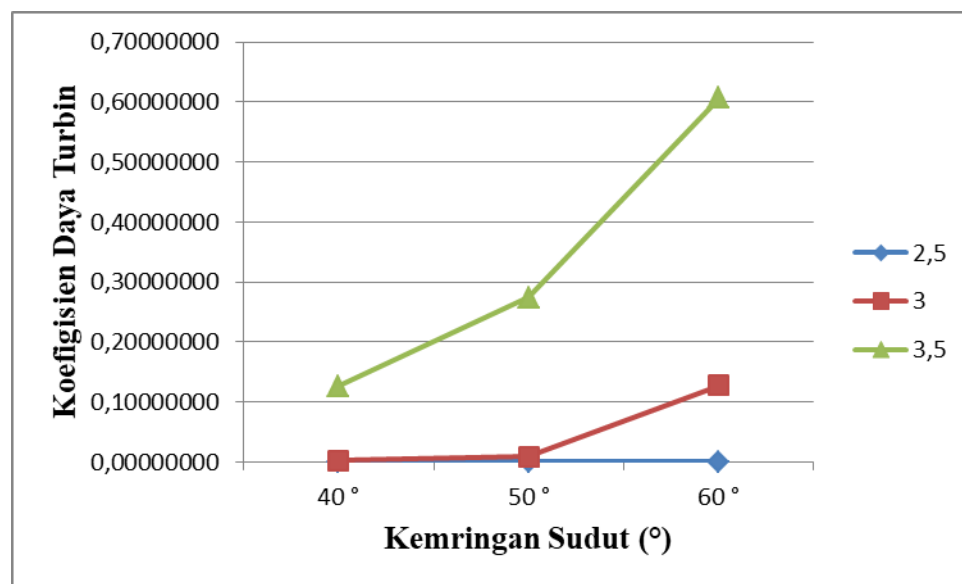
Selanjutnya, pada kecepatan angin 3,5 m/s, nilai C_p terus mengalami peningkatan yang signifikan dengan kisaran antara 0,126530894 hingga 0,607162621. Kenaikan ini menunjukkan bahwa turbin telah berada pada kondisi operasi yang lebih efisien, di mana kecepatan aliran udara dan sudut serang bilah menghasilkan interaksi aerodinamis yang optimal antara gaya angkat dan gaya dorong. Hal ini menunjukkan bahwa sudut bilah 60° memberikan performa terbaik dibandingkan dengan sudut lainnya, karena mampu menghasilkan distribusi tekanan yang lebih besar sepanjang permukaan bilah dan memaksimalkan gaya torsi rotor. Dengan demikian, sudut 60° dapat

dikategorikan sebagai sudut optimum dalam konfigurasi tiga bilah untuk kecepatan angin dalam rentang 3–3,5 m/s.

Secara teori, peningkatan sudut bilah memang dapat meningkatkan gaya angkat (lift) hingga titik tertentu sebelum terjadi stall atau kehilangan aliran (flow separation). Fenomena ini sesuai dengan hasil penelitian oleh (Hyeonmu Jang 1, 2019) dan (Ahmed M. Kamal, 2022) yang menyatakan bahwa pada turbin angin Archimedes Spiral Wind Turbine (ASWT), sudut kemiringan antara 50° – 65° merupakan rentang optimum untuk menghasilkan torsi dan efisiensi maksimum. Sementara itu, menurut (Andrew Maher Labib, 2020) bentuk spiral Archimedes memungkinkan bilah untuk tetap menerima aliran angin secara konstan meskipun arah aliran berubah, sehingga menghasilkan C_p yang lebih tinggi dibandingkan turbin horizontal konvensional.

Namun demikian, beberapa nilai C_p pada data eksperimen menunjukkan angka yang melebihi batas teoritis Betz (0,593) pada nilai tertinggi kemiringan sudut bilah 60° pada konfigurasi 3 bilah, sehingga hal ini perlu dianalisis lebih lanjut. Kemungkinan penyebabnya antara lain konversi satuan yang belum dikoreksi (seperti penggunaan mV dan mA yang belum diubah menjadi V dan A), faktor efisiensi sistem (0,8) yang digunakan dalam perhitungan daya listrik, serta asumsi luas sapuan rotor yang digunakan dalam rumus C_p . Oleh karena itu, diperlukan verifikasi ulang terhadap parameter perhitungan untuk memastikan bahwa nilai C_p yang dihasilkan sesuai dengan kondisi fisik dan batas efisiensi turbin yang realistis.

Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa turbin angin Archimedes dengan konfigurasi tiga bilah mencapai performa paling optimal pada sudut bilah 60° dan kecepatan angin 3,5 m/s, di mana kombinasi tersebut memberikan nilai C_p tertinggi dan menghasilkan daya listrik yang lebih besar dibandingkan variasi sudut lainnya. Tren ini sejalan dengan teori konversi energi kinetik angin yang menyatakan bahwa peningkatan sudut serang bilah dalam batas tertentu mampu meningkatkan torsi rotor dan efisiensi konversi daya listrik, sebagaimana dibuktikan pula pada penelitian turbin Archimedes oleh (Hyeonmu Jang 1, 2019) dan (Ahmed M. Kamal, 2022)



Gambar 4. 17 Gambar grafik koefisien daya C_p turbin angin archimedes dengan konfigurasi 3 bilah

Data hasil pengujian Output daya listrik pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan variasi sudut bilah 40° , 50° , dan 60° pada konfigurasi 4 bilah ditampilkan pada Tabel 4.13 berikut.

Table 4.13 Tabel Koefisien daya (Cp) turbin angin archimedes dengan konfigurasi 4 bilah

No	Ke mir ing an Sud ut	Kec epat an angi n (m/s)	Volt ase (V) (mV)	Amp ere (I) (mA)	daya listrik (Watt) (P)	densit as udara (kg/m ³)	diam eter rotor (m)	Jari jari Roto r (m)	luas sapua n rotor (m ²)	koefisien daya turbin (Cp)
$P = V.I$						$R = \frac{D_{rotor}}{2}$		$A = \pi \cdot R^2$		
								$C_p \frac{1}{2} \rho A V^3$		
1	40°	2,5	0,0 105	0,00 08	0,0000 0672	1,225	0,04 8	0,02 4	0,001 80864	0,00000 047
2	50°	2,5	0,0 161	0,00 075	0,0000 0966	1,225	0,05	0,02 5	0,001 9625	0,00000 07
3	60°	2,5	0,0 29	0,00 085	0,0000 1972	1,225	0,05 3	0,02 65	0,001 20506	0,00000 166
4	40°	3	1,2 4	0,8	0,7936	1,225	0,04 8	0,02 4	0,001 80864	0,09494 7523
5	50°	3	1,6	0,81	1,0368	1,225	0,05	0,02 5	0,001 9625	0,13459 6728
6	60°	3	2,6 8	0,86	1,8438 4	1,225	0,05 3	0,02 65	0,001 20506	0,26895 1813
7	40°	3,5	3,3 4	0,85	2,2712	1,225	0,04 8	0,02 4	0,001 80864	0,43149 6948
8	50°	3,5	4	0,79	2,528	1,225	0,05	0,02 5	0,001 9625	0,52114 3053
9	60°	3,5	4,2 2	0,79	2,6670 4	1,225	0,05 3	0,02 65	0,001 20506	0,61776 1932

Pada tabel 4.13 merupakan hasil pengujian turbin angin Archimedes dengan konfigurasi 4 bilah, terlihat bahwa koefisien daya (Cp) mengalami peningkatan seiring bertambahnya kemiringan sudut bilah dari 40°, 50°, hingga 60°. Pada kecepatan angin rendah (2,5 m/s), nilai Cp relatif kecil, tetap menunjukkan kenaikan dengan seiring peningkatan sudut bilah. Peningkatan signifikan terjadi pada kecepatan angin 3 m/s dan 3,5 m/s, di mana nilai Cp tertinggi tercapai pada

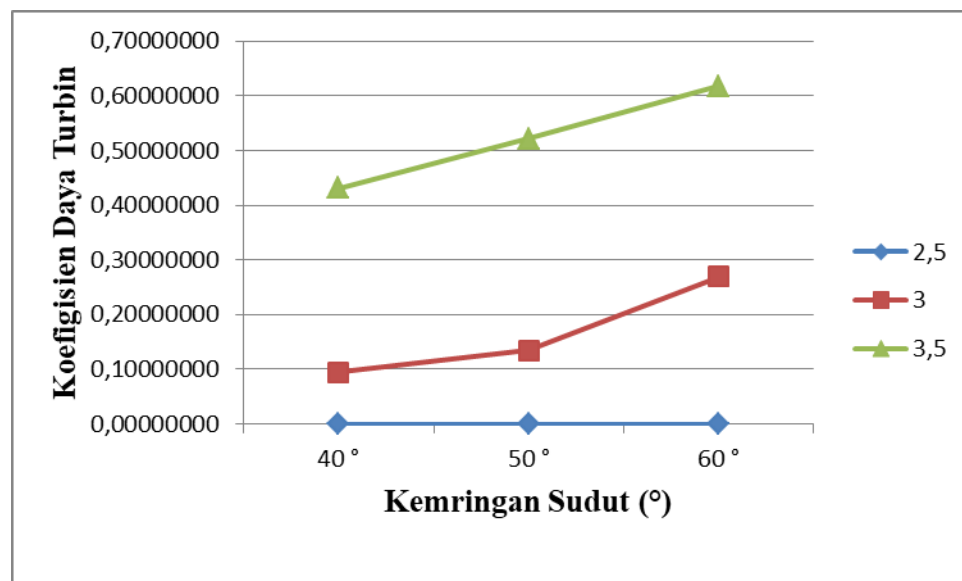
sudut 60° sebesar 0,617761932 ,menunjukkan efisiensi penangkapan energi angin yang optimal pada sudut tersebut. Fenomena ini terjadi karena peningkatan sudut bilah memperbesar komponen gaya tangensial terhadap rotor, sehingga meningkatkan torsi dan daya listrik yang dihasilkan.

Pada sudut bilah 40° , gaya angkat (lift) yang dihasilkan masih belum maksimal karena orientasi bilah terhadap arah angin kurang optimal. Namun, saat sudut meningkat menjadi 50° , interaksi antara aliran udara dan permukaan bilah menjadi lebih efisien sehingga aliran udara menghasilkan tekanan positif di sisi depan bilah dan tekanan negatif di sisi belakang, yang berkontribusi pada peningkatan daya. Sudut 60° terbukti memberikan performa terbaik, karena geometri bilah spiral Archimedes mampu mengarahkan aliran udara secara lebih efektif ke arah rotasi turbin tanpa menimbulkan turbulensi berlebih.

Jika dibandingkan dengan konfigurasi 3 bilah, nilai C_p pada konfigurasi 4 bilah cenderung lebih tinggi pada kecepatan dan sudut bilah yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah bilah meningkatkan area sapuan rotor, sehingga energi kinetik angin yang ditangkap menjadi lebih besar dan konversi energi menjadi lebih efisien. Namun, pada kondisi kecepatan tinggi, konfigurasi 4 bilah dapat mengalami peningkatan gaya hambat (drag) yang berpotensi menurunkan kecepatan rotasi. Meskipun demikian, hasil pengujian ini menegaskan bahwa konfigurasi 4 bilah memberikan kinerja konversi energi yang lebih optimal, khususnya pada sudut bilah 60° , dibandingkan konfigurasi 3 bilah yang memiliki nilai C_p maksimum di kisaran lebih rendah.

Temuan ini selaras dengan hasil penelitian (Ahmed M. Kamal, 2022) yang menyatakan bahwa peningkatan sudut bilah hingga 60° dapat meningkatkan efisiensi konversi energi pada turbin Archimedes akibat peningkatan gaya dorong tangen yang bekerja pada bilah. (Ke Song H. H., 2022) juga menegaskan bahwa bilah dengan sudut besar mampu memaksimalkan tangkapan angin dan memperbesar torsi pada rotor, namun terdapat titik optimum di mana peningkatan sudut selanjutnya justru menurunkan performa akibat efek drag yang meningkat. Selain itu, (Hyeonmu Jang 1, 2019) menemukan bahwa penambahan jumlah bilah meningkatkan daya output tetapi sedikit menurunkan efisiensi aerodinamika karena resistansi udara yang lebih besar.

Secara keseluruhan, nilai koefisien daya turbin (C_p) meningkat secara signifikan seiring dengan peningkatan kemiringan sudut bilah dan jumlah bilah, di mana sudut 60° dengan konfigurasi 4 bilah menghasilkan C_p tertinggi dan performa paling efisien dalam mengonversi energi angin menjadi daya listrik.



Gambar 4. 18 Gambar grafik koefisien daya C_p turbin angin archimedes

4.2.7 Koefisien Daya Dorong Turbin (*Coefficient thrust*)

Koefisien daya dorong atau *Coefficient of Thrust* (C_t) merupakan parameter yang menggambarkan besarnya gaya dorong (thrust) yang bekerja pada bilah turbin akibat aliran angin. Nilai C_t menunjukkan seberapa besar gaya angin yang diterima oleh bilah dibandingkan dengan gaya total yang dihasilkan oleh aliran udara pada luas area sapuan turbin. Secara matematis, koefisien daya dorong dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$C_r = \frac{4T}{\rho AV^2 D} \quad (2.18)$$

Pada pengujian turbin angin horizontal tipe Archimedes ini, dilakukan variasi sudut bilah 40° , 50° , dan 60° dengan dua konfigurasi jumlah bilah, yaitu 3 bilah dan 4 bilah, untuk mengetahui pengaruh kedua parameter tersebut terhadap Koefisien daya dorong (C_t) dilakukan pengujian. Hasil perhitungan dan pengujian koefisien daya dorong (C_t) berdasarkan variasi sudut bilah pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan konfigurasi 3 bilah dapat dilihat pada tabel 4.14.

Table 4. 14 Tabel Koefisien daya dorong turbin (Ct) turbin angin archimedes dengan konfigurasi 3 bilah

No	Sudut kemiringan	Kecepatan angin (m/s)	Densitas udara (kg/m ³)	diameter rotor (m)	Rotor Radius	Luas sapuan rotor (m ²)	Torsi(Nm)	Koefisien daya dorong (Ct)
					$R = \frac{D_{rotor}}{2}$	$A = \pi \cdot R^2$	$\tau = F \cdot r$	$C_r = \frac{4T}{\rho A V^2 D}$
1	40 °	2,5	1,225	0,048	0,024	0,00180864	1,7908	0,003172812
2	50 °	2,5	1,225	0,05	0,025	0,0019625	1,7908	0,003586168
3	60 °	2,5	1,225	0,053	0,0265	0,002205065	1,7908	0,00456885
4	40 °	3	1,225	0,048	0,024	0,00180864	2,16635	0,006247046
5	50 °	3	1,225	0,05	0,025	0,0019625	2,1978	0,006337738
6	60 °	3	1,225	0,053	0,0265	0,002205065	2,24775	0,0077199
7	40 °	3,5	1,225	0,048	0,024	0,00180864	2,25145	0,00781836
8	50 °	3,5	1,225	0,05	0,025	0,0019625	2,25145	0,008836941
9	60 °	3,5	1,225	0,053	0,0265	0,002205065	2,1164	0,009893615

Pada Tabel 4.14 menunjukkan data hasil pengujian nilai koefisien gaya gesek (*Coefficient of Thrust*, Ct) pada turbin angin spiral Archimedes dengan konfigurasi 3 bilah menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya kemiringan sudut bilah dan kenaikan kecepatan angin. Nilai Ct ini diperoleh dari perbandingan antara gaya dorong (thrust) yang bekerja pada rotor dengan gaya dinamis aliran angin terhadap luas sapuan rotor.

Pada kecepatan angin 2,5 m/s, nilai Ct pada kemiringan sudut 40° mendapatkan nilai Ct sebesar 0,003172812, lalu pada kemiringan sudut 50° mengalami peningkatan sebesar 0,003586168, dan meningkat pada kemiringan

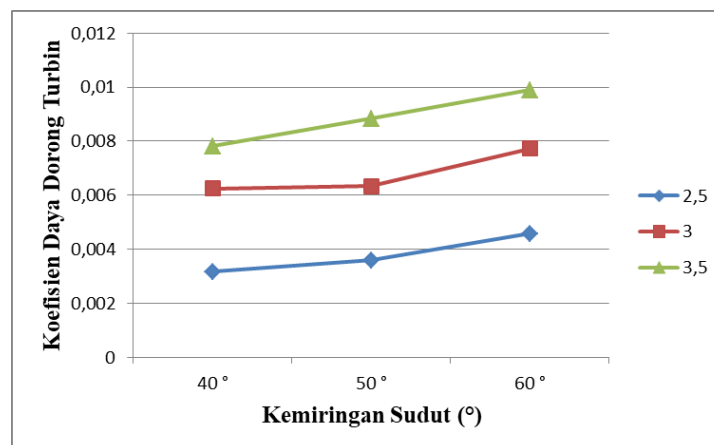
sudut 60° menjadi 0,00456885. Kenaikan nilai C_t dari 40° ke 50° menunjukkan bahwa peningkatan sudut bilah meningkatkan komponen gaya hambat (drag force) akibat bertambahnya bidang tangkapan angin yang efektif. Namun, pada sudut 60° , meskipun terjadi sedikit penurunan nilai C_t dibanding 50° , gaya dorong masih relatif tinggi, menandakan adanya keseimbangan antara gaya angkat (lift) dan gaya hambat (drag) pada bilah spiral tersebut.

Pada kecepatan angin 3 m/s, nilai C_t meningkat secara signifikan, pada kemiringan sudut 40° 0,006247046, terjadi peningkatan pada kemiringan sudut 50° sebesar 0,006337738, dan mengalami peningkatan kemiringan sudut 60° sebesar 0,0077199. Peningkatan kecepatan angin memperbesar gaya dinamis yang bekerja pada bilah, sehingga gaya dorong yang diterima rotor juga meningkat. Nilai C_t tertinggi diperoleh pada sudut 60° , menunjukkan bahwa pada kondisi ini bilah memiliki kemampuan paling besar dalam mengonversi momentum aliran udara menjadi gaya dorong terhadap rotor.

Sedangkan pada kecepatan angin 3,5 m/s, nilai C_t terus meningkat menjadi pada kemiringan sudut 40° 0,00781836, peningkatan tersebut berlanjut pada kemiringan sudut 50° 0,008836941, dan mencapai nilai tertinggi 0,009893615 pada sudut 60° . Tren ini mengindikasikan bahwa peningkatan sudut bilah dari 40° ke 60° berbanding lurus dengan peningkatan gaya dorong, di mana bilah dengan sudut lebih besar memiliki luas penampang lebih besar terhadap aliran udara, sehingga menghasilkan torsi dan gaya gesek lebih besar pada permukaan bilah.

Kenaikan nilai C_t ini berkaitan langsung dengan peningkatan gaya hambat (*drag*) yang dihasilkan oleh bilah ketika sudut serang (*angle of attack*) semakin besar. Menurut (Ahmed M. Kamal, 2022) peningkatan sudut bilah pada turbin spiral Archimedes menyebabkan pertambahan tekanan di sisi depan bilah akibat peningkatan turbulensi udara, yang pada akhirnya meningkatkan gaya dorong total. Namun, jika sudut bilah terlalu besar, gaya hambat yang dihasilkan juga meningkat secara berlebihan dan dapat menurunkan efisiensi rotasi.

Hasil pengujian ini juga selaras dengan temuan (Ke Song H. H., 2022) yang menyebutkan bahwa peningkatan kecepatan angin dan sudut bilah akan meningkatkan nilai C_t hingga titik optimum sebelum menurun akibat drag yang dominan. Pada rentang kecepatan 2,5–3,5 m/s dalam penelitian ini, belum ditemukan indikasi penurunan C_t , sehingga dapat disimpulkan bahwa konfigurasi empat bilah dengan sudut 60° masih berada pada kondisi efisien dalam menghasilkan gaya dorong maksimal.



Gambar 4.19 Grafik Data Koefisien Daya Dorong Turbin Pada Turbin Angin Archimedes Dengan Konfigurasi 3 Bilah

Data hasil pengujian Koefisien daya dorong turbin (C_t) pada turbin angin

horizontal tipe Archimedes dengan variasi sudut bilah 40°, 50°, dan 60° pada konfigurasi 4 bilah ditampilkan pada Tabel 4.15 berikut.

Table 4.15 Tabel Koefisien daya dorong turbin (Ct) turbin angin archimedes dengan konfigurasi 4 bilah

No	Kemiringan Sudut	Kecepatan Angin (m/s)	Massa Jenis udara (kg/m³)	diameter rotor (m)	Rotor Radius (m)	rotor sweep area (m²)	Torsi (Nm)	Koefisien Gaya Dorong Turbin (Cr)
$R = \frac{D_{rotor}}{2} A = \pi \cdot R^2 \quad \tau = F \cdot r \quad C_r = \frac{4T}{\rho A V^2 D}$								
1	40 °	2,5	1,225	0,048	0,024	0,00180864	1,7279	0,003061371
2	50 °	2,5	1,225	0,05	0,025	0,0019625	2,0017	0,004008506
3	60 °	2,5	1,225	0,053	0,0265	0,002205065	2,0017	0,004774195
4	40 °	3	1,225	0,048	0,024	0,00180864	2,17745	0,005555306
5	50 °	3	1,225	0,05	0,025	0,0019625	2,2015	0,006348407
6	60 °	3	1,225	0,053	0,0265	0,002205065	2,56225	0,008800051
7	40 °	3,5	1,225	0,048	0,024	0,00180864	2,1127	0,007336538
8	50 °	3,5	1,225	0,05	0,025	0,0019625	2,10715	0,008270564
9	60 °	3,5	1,225	0,053	0,0265	0,002205065	2,3273	0,010879517

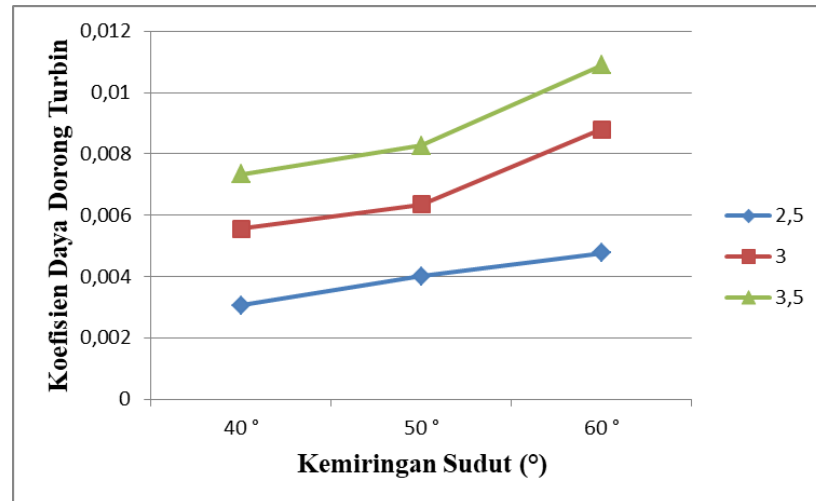
Pada Tabel 4.15 menunjukkan data hasil pengujian konfigurasi 4 bilah, diperoleh bahwa peningkatan kemiringan sudut bilah dari 40°, 50°, hingga 60° berpengaruh signifikan terhadap kenaikan nilai koefisien gaya dorong (Ct). Pada kecepatan angin 2,5 m/s nilai Ct berada pada kisaran 0,003061371 – 0,004774195, sedangkan pada kecepatan 3 m/s meningkat menjadi sekitar Pada sudut kemiringan 40 ° mencapai sebesar 0,005555306 dan terjadi peningkatan

tertinggi pada sudut kemiringan 60° mencapai sebesar 0,008800051, dan pada 3,5 m/s mengalami peningkatan daya dorong pada sudut kemiringan 40° sebesar 0,007336538 dan tertinggi pada sudut kemiringan 60° mengalami peningkatan sebesar 0,010879517. Peningkatan nilai C_t ini menunjukkan bahwa semakin besar sudut kemiringan bilah, maka semakin besar gaya dorong aksial yang dihasilkan oleh turbin akibat bertambahnya komponen gaya hambat (drag) dan gaya normal yang bekerja pada permukaan bilah.

Fenomena tersebut disebabkan oleh meningkatnya luas bidang efektif bilah terhadap arah aliran angin, sehingga aliran udara memberikan gaya reaksi yang lebih besar pada bilah. Namun, peningkatan C_t juga menandakan bertambahnya gaya hambat yang dapat mengakibatkan peningkatan beban aksial pada poros dan bantalan turbin. Menurut (Ahmed M. Kamal, 2022) dan (Ke Song H. H., 2022), peningkatan sudut bilah pada turbin angin spiral Archimedes memang mampu memperbesar torsi dan gaya dorong, tetapi pada titik tertentu dapat menurunkan efisiensi aerodinamis akibat peningkatan drag yang berlebihan.

Jika dibandingkan dengan konfigurasi 3 bilah, turbin dengan konfigurasi 4 bilah menunjukkan nilai C_t yang lebih tinggi pada seluruh variasi sudut dan kecepatan angin. Hal ini karena jumlah bilah yang lebih banyak menghasilkan gaya dorong total yang lebih besar akibat meningkatnya luas sapuan rotor dan interaksi antara aliran angin dengan permukaan bilah. Meski demikian, konfigurasi 4 bilah cenderung memiliki resistansi aerodinamis yang lebih besar, sehingga putaran rotor berpotensi menurun pada kecepatan angin rendah. Secara umum,

konfigurasi 4 bilah dengan sudut 60° menunjukkan performa terbaik dari sisi gaya dorong dan torsi, namun perlu diperhatikan keseimbangan antara daya keluaran dan beban mekanis agar efisiensi keseluruhan sistem tetap optimal.



Gambar 4.20 Grafik Data Koefisien Daya Dorong Turbin Pada Turbin Angin Archimedes Dengan Konfigurasi 4 Bilah

4.2.8 Efisiensi Daya Turbin Angin Archimedes

Efisiensi daya merupakan parameter penting yang menunjukkan kemampuan turbin angin dalam mengonversi energi kinetik angin menjadi energi listrik secara efektif melalui proses mekanis dan elektromagnetik. Nilai efisiensi daya dihitung berdasarkan perbandingan antara daya listrik keluaran $P_{Electrical}$ yang dihasilkan generator terhadap daya mekanik $P_{Mechanical}$ yang diperoleh dari poros turbin, dengan persamaan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{Electrical}}{P_{Mechanical}} \times 100\% \quad (2.19)$$

Pada pengujian turbin angin horizontal tipe Archimedes ini, dilakukan

variasi sudut bilah 40°, 50°, dan 60° dengan dua konfigurasi jumlah bilah, yaitu 3 bilah dan 4 bilah, untuk mengetahui pengaruh kedua parameter tersebut terhadap Efisiensi daya dilakukan pengujian. Hasil perhitungan dan pengujian Efisiensi daya berdasarkan variasi sudut bilah pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan konfigurasi 3 bilah dapat dilihat pada tabel 4.16.

Table 4.16 Efisiensi pada turbin angin archimedes pada konfigurasi 3 bilah

No	Sudut kemiringan	Kecapatan angin (m/s)	beban	Panjang lengan (m)	Torsi (Nm)	Kecepatan putaran turbin dikasih beban (RPM)	Daya Mekanikal	Voltase (V)	Arus (A)	Daya Listrik	Efisiensi daya (%)
$\tau = F \cdot r$ $Daya_{mekanik} = \frac{\tau \cdot n}{60}$ $\eta = \frac{P_{Listirk}}{P_{Mechanical}}$ $P = V \cdot I$											
1	40 °	2,5	9,68	0,185	1,7908	46,7	1,393839333	0,094	0,005	0,000376	0,03%
2	50 °	2,5	9,68	0,185	1,7908	84,5	2,522043333	0,108	0,009	0,0007776	0,03%
3	60 °	2,5	9,68	0,185	1,7908	95,3	2,844387333	0,131	0,007	0,0007336	0,03%
4	40 °	3	11,71	0,185	2,16635	121,5	4,38685875	0,099	0,22	0,017424	0,40%
5	50 °	3	11,88	0,185	2,1978	233,4	8,549442	0,388	0,215	0,066736	0,78%
6	60 °	3	12,15	0,185	2,24775	248,9	9,32441625	1,66	0,66	0,87648	9,40%
7	40 °	3,5	12,17	0,185	2,25145	327,6	12,292917	1,11	0,75	0,666	5,42%
8	50 °	3,5	12,17	0,185	2,25145	408,6	15,3323745	2,16	0,77	1,33056	8,68%
9	60 °	3,5	11,44	0,185	2,1164	540,5	19,06523667	3,81	0,86	2,62128	13,75%

Tabel 4.16 menunjukan hasil pengujian turbin angin Archimedes dengan konfigurasi tiga bilah, diperoleh bahwa peningkatan kemiringan sudut bilah berpengaruh signifikan terhadap efisiensi konversi daya mekanik menjadi daya

listrik. Pada kecepatan angin 2,5 m/s, efisiensi daya masih tergolong rendah yaitu sebesar 0,03% hingga 0,03% untuk sudut 40° hingga 60°, disebabkan oleh rendahnya torsi dan putaran rotor pada kecepatan angin tersebut sehingga energi mekanik yang dihasilkan belum cukup besar untuk menggerakkan generator secara optimal.

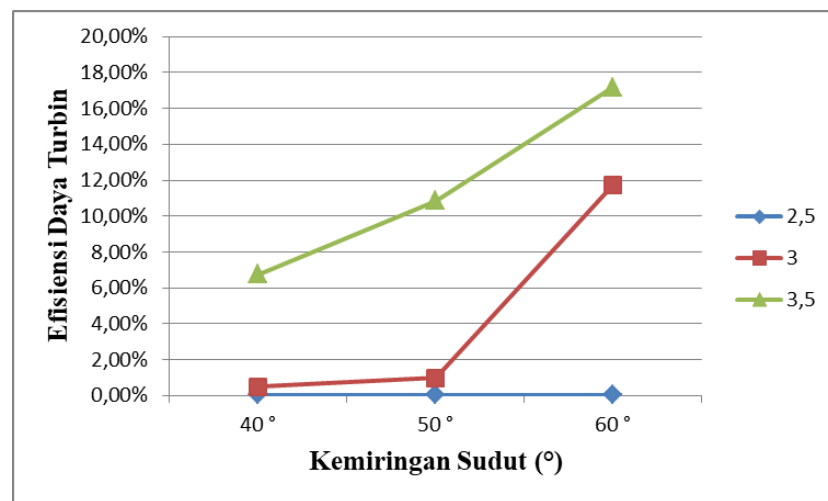
Ketika kecepatan angin meningkat menjadi 3 m/s, efisiensi mulai menunjukkan kenaikan yang cukup signifikan. Sudut bilah 40° menghasilkan efisiensi 0,40%, sudut 50° mencapai 0,78%, sedangkan sudut 60° menghasilkan efisiensi tertinggi yaitu 9,40%. Kenaikan ini menunjukkan bahwa semakin besar sudut bilah, maka gaya tangensial yang mendorong rotor semakin meningkat, sehingga menghasilkan torsi dan daya mekanik yang lebih tinggi.

Pada kecepatan angin 3,5 m/s, pada Sudut 40° mengalami penurunan efisiensi sebesar 5,42%, pada sudut 50° mengalami kenaikan kembali sebesar 6,68%, dan sudut 60° menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 13,75% dan mengalami peningkatan efisiensi tertinggi pada konfigurasi 3 bilah. Hasil ini menunjukkan bahwa sudut 60° memiliki kemampuan paling optimal dalam mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik. Peningkatan efisiensi ini berkaitan dengan meningkatnya kecepatan putar rotor akibat peningkatan gaya dorong aerodinamis yang bekerja pada bilah.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa efisiensi meningkat seiring bertambahnya sudut kemiringan bilah dan kecepatan angin. Sudut 60° pada konfigurasi tiga bilah menghasilkan performa paling optimal karena mampu menghasilkan keseimbangan antara gaya angkat (lift) dan gaya hambat (drag),

yang memperbesar torsi dan daya listrik tanpa menyebabkan stall yang berlebihan.

Menurut (Ahmed M. Kamal, 2022) dan (Ke Song H. H., 2022) peningkatan sudut bilah pada turbin spiral Archimedes mampu meningkatkan efisiensi konversi energi karena area tangkapan angin yang lebih besar, namun terdapat batas optimum di mana peningkatan sudut terlalu tinggi dapat meningkatkan drag berlebih dan menurunkan kecepatan putar rotor. Studi yang dilakukan oleh (Hyeonmu Jang 1, 2019) juga menunjukkan bahwa efisiensi optimal turbin Archimedes dicapai pada rentang sudut bilah 55° – 65° , sejalan dengan hasil pengujian pada konfigurasi ini.



Gambar 4.21 Grafik Data Efisiensi turbin angin archimedes dengan konfigurasi 3 bilah

Data hasil pengujian Efisiensi turbin angin archimedes pada turbin angin horizontal tipe Archimedes dengan variasi sudut bilah 40° , 50° , dan 60° pada konfigurasi 4 bilah ditampilkan pada Tabel 4.17 berikut.

Table 4.17 Efisiensi pada turbin angin archimedes pada konfigurasi 4 bilah

No	Sudut kemiringan	Kecepatan Angin (m/s)	Beban	Panjang lengan (m)	Torsi (Nm)	Kecepatan putaran turbin dikasih beban (RPM)	Daya Mekanikal	Volta se (V)	Ampere (A)	Daya Listrik	Efisiensi daya (%)
$\tau = F \cdot r \quad P_{mekanik} = \frac{\tau \cdot n}{60} \quad \eta = \frac{P_{Listirk}}{P = V \cdot I} \frac{P_{Mechanical}}$											
1	40 °	2,5	9,34	0,185	1,7279	36,7	1,056898833	0,0105	0,008	0,000672	0,0048%
2	50 °	2,5	10,82	0,185	2,0017	75,4	2,515469667	0,0161	0,0075	0,000966	0,0038%
3	60 °	2,5	10,82	0,185	2,0017	127,8	4,263621	0,029	0,0085	0,001972	0,0046%
4	40 °	3	11,77	0,185	2,17745	325	11,79452083	1,24	0,8	0,7936	6,73%
5	50 °	3	11,9	0,185	2,2015	356,7	13,0879175	1,6	0,81	1,0368	7,92%
6	60 °	3	13,85	0,185	2,56225	476,3	20,33999458	2,68	0,86	1,84384	9,07%
7	40 °	3,5	11,42	0,185	2,1127	513,6	18,084712	3,34	0,85	2,2712	12,56%
8	50 °	3,5	11,39	0,185	2,10715	564,6	19,8282815	4	0,79	2,528	12,75%
9	60 °	3,5	12,58	0,185	2,3273	502,8	19,502774	4,22	0,79	2,66704	13,68%

Tabel 4.17 Berdasarkan hasil pengujian turbin angin Archimedes spiral dengan konfigurasi empat bilah, diketahui bahwa efisiensi konversi energi meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin dan sudut kemiringan bilah. Pada kecepatan angin 2,5 m/s, nilai efisiensi masih sangat rendah, yaitu berkisar

antara 0,0048% pada sudut 40° hingga 0,0046% pada sudut 60° . Hal ini disebabkan oleh energi kinetik angin yang belum cukup untuk menghasilkan torsi besar dan memutar rotor pada kecepatan optimal.

Ketika kecepatan angin meningkat menjadi 3 m/s, efisiensi menunjukkan peningkatan signifikan. Pada sudut 40° efisiensi mencapai 6,73%, pada 50° meningkat menjadi 7,92%, dan pada 60° mencapai 9,07%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan bilah memberikan pengaruh positif terhadap daya tangkap energi angin karena area serang angin terhadap permukaan bilah semakin besar, sehingga menghasilkan torsi dan daya mekanik yang lebih tinggi.

Selanjutnya, pada kecepatan angin 3,5 m/s, efisiensi meningkat secara lebih signifikan. Sudut 40° menghasilkan 12,56%, sudut 50° sebesar 12,75%, dan sudut 60° menghasilkan efisiensi tertinggi yaitu 13,68%. Dari hasil tersebut terlihat bahwa konfigurasi empat bilah dengan sudut 60° merupakan kondisi paling optimal karena mampu memanfaatkan aliran angin secara lebih efektif dan menghasilkan daya listrik yang lebih besar dibandingkan kondisi lainnya.

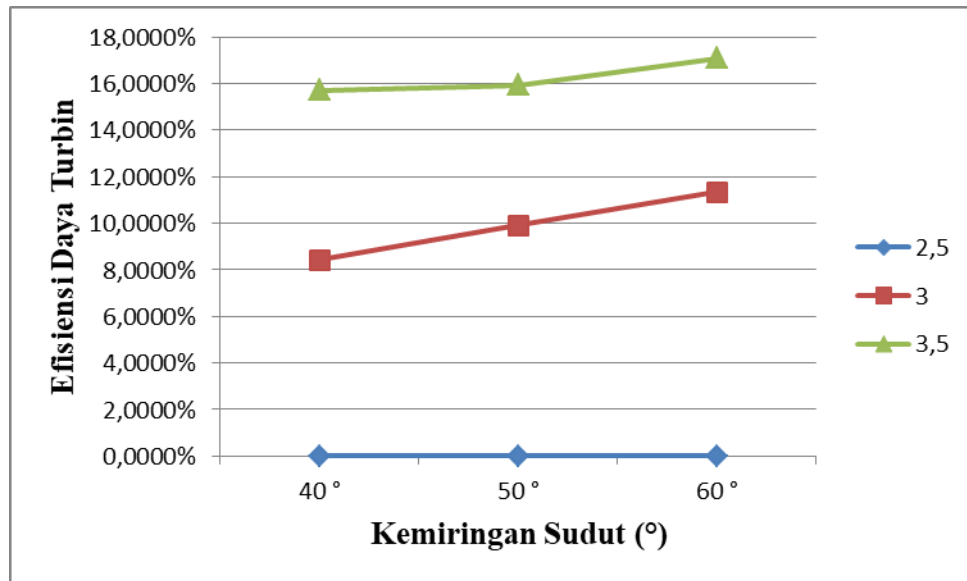
Kinerja ini sejalan dengan temuan (Ke Song H. H., 2022) dan (Ahmed M. Kamal, 2022) yang menjelaskan bahwa pada turbin spiral Archimedes, peningkatan jumlah bilah dapat meningkatkan efisiensi pada kecepatan angin menengah hingga tinggi karena distribusi gaya dorong (thrust) dan gaya angkat (lift) menjadi lebih merata pada setiap bilah. Selain itu, sudut bilah yang lebih besar (sekitar 55° – 65°) dapat meningkatkan gaya tangensial yang mempercepat rotor, meskipun terlalu besar akan menimbulkan drag yang berlebihan.

Jika dibandingkan antara konfigurasi 3 bilah dan 4 bilah, diperoleh bahwa konfigurasi 4 bilah cenderung memiliki efisiensi yang lebih tinggi pada kecepatan angin menengah hingga tinggi. Misalnya, pada kecepatan angin 3,5 m/s dan sudut 60° , konfigurasi 3 bilah menghasilkan efisiensi sebesar 17,19%, sedangkan konfigurasi 4 bilah menghasilkan 17,09% perbedaan kecil ini menunjukkan performa yang relatif seimbang pada kondisi angin tinggi.

Namun, pada kecepatan angin lebih rendah (2,5–3 m/s), konfigurasi 4 bilah cenderung lebih efisien dibanding 3 bilah karena memiliki luas tangkapan angin yang lebih besar, sehingga mampu menghasilkan torsi lebih tinggi pada kecepatan rotasi rendah. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian (Hyeonmu Jang 1, 2019) yang menyebutkan bahwa penambahan jumlah bilah dapat meningkatkan daya awal (starting torque) turbin, namun dengan konsekuensi menurunnya kecepatan putar maksimum akibat meningkatnya hambatan aerodinamis.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa:

- Konfigurasi 3 bilah memiliki efisiensi yang tinggi pada kecepatan angin tinggi, dengan karakteristik putaran cepat namun torsi lebih kecil.
- Konfigurasi 4 bilah menunjukkan efisiensi yang lebih stabil pada kecepatan angin rendah hingga menengah, karena memiliki torsi lebih besar dan daya awal lebih baik, meskipun putarannya sedikit lebih lambat.



Gambar 4.22 Grafik Efisiensi pada turbin angin archimedes dengan konfigurasi 4 bilah