

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

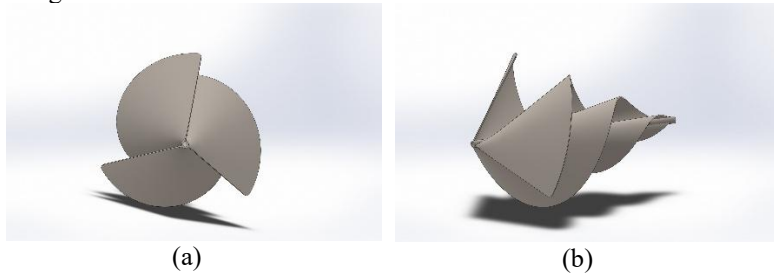
4.1 Desain Geometri dan Konfigurasi Domain Simulasi

4.1.1 Geometri Turbin yang Disimulasikan

Geometri turbin dalam penelitian ini dimodelkan dengan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks 2020*. Terdapat dua tipe turbin angin sumbu vertikal (VAWT) yang dianalisis, yaitu turbin Fibonacci dan turbin Savonius. Pemodelan geometri dilakukan dengan merujuk pada parameter geometrik yang sama untuk kedua turbin agar perbandingan performa dapat dilakukan secara adil (*fair comparison*). Parameter geometrik utama yang diseragamkan mencakup diameter turbin, luas sapuan, serta jumlah bilah. Perbedaan utama antara kedua model terletak pada bentuk bilah, di mana turbin Fibonacci memiliki bentuk spiral, sedangkan turbin Savonius memiliki tiga bilah berbentuk setengah lingkaran.

A. Geometri Turbin Fibonacci

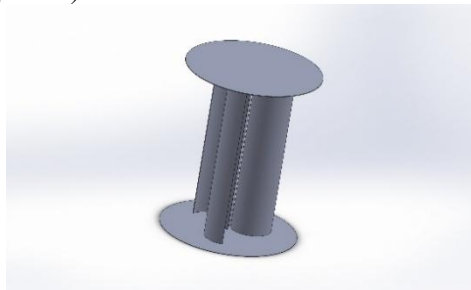
Turbin Fibonacci dimodelkan dengan sudu yang berbentuk spiral, mengikuti kurva Fibonacci.



Gambar 4. 1 Model 3D Turbin Fibonacci
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

B. Geometri Turbin Savonius

Turbin Savonius dirancang dengan tiga bilah yang memiliki bentuk setengah lingkaran. Konfigurasi ini merupakan representasi klasik dari turbin Savonius yang beroperasi berdasarkan prinsip gaya hambat (*drag-based*).



Gambar 4. 2 Model 3D Turbin Savonius
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

4.2 Simulasi Domain 1 (Perhitungan RPM)

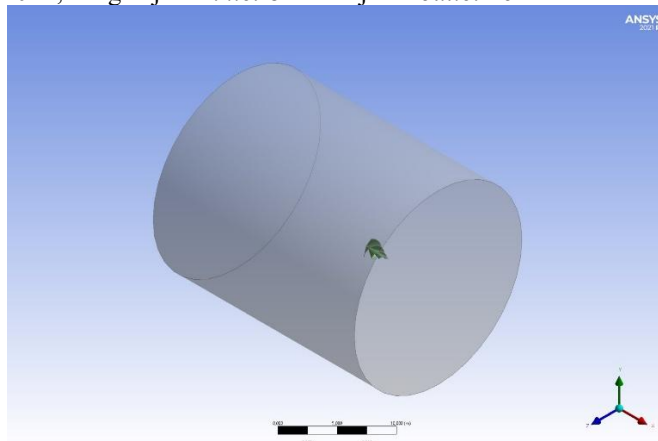
Simulasi domain 1 dilakukan untuk memperoleh nilai kecepatan putar turbin (RPM) yang selanjutnya digunakan sebagai input pada simulasi domain 2. Pada tahap ini, simulasi dilakukan menggunakan ANSYS Fluent 2021 dengan pendekatan *steady-state*. Variasi kecepatan angin yang digunakan yaitu 2 m/s, 3 m/s, dan 5 m/s untuk kedua jenis turbin.

Model turbulensi yang digunakan berbeda untuk masing-masing turbin. Turbin Fibonacci menggunakan model turbulensi *k-omega SST* karena model ini mampu memprediksi karakteristik aliran dengan gradien tekanan yang kompleks di sekitar permukaan sudu. Model ini juga dikenal memiliki akurasi yang baik dalam memodelkan aliran di dekat dinding (*near-wall treatment*) (An & Fung, 2018). Sementara itu, turbin Savonius menggunakan model turbulensi *k-epsilon realizable* karena model ini memberikan kestabilan numerik yang baik pada simulasi aliran rotasi serta mampu merepresentasikan pola aliran pada turbin tipe *drag* secara memadai (A. Dewan et al., 2023; Mosbahi et al., 2021; Sefidgar et al., 2023).

Boundary condition yang digunakan terdiri dari *velocity inlet* pada sisi masuk aliran, *pressure outlet* pada sisi keluar aliran, serta *wall* pada permukaan turbin dan dinding domain. Nilai RPM diperoleh berdasarkan distribusi *tangential velocity* yang dihasilkan dari simulasi.

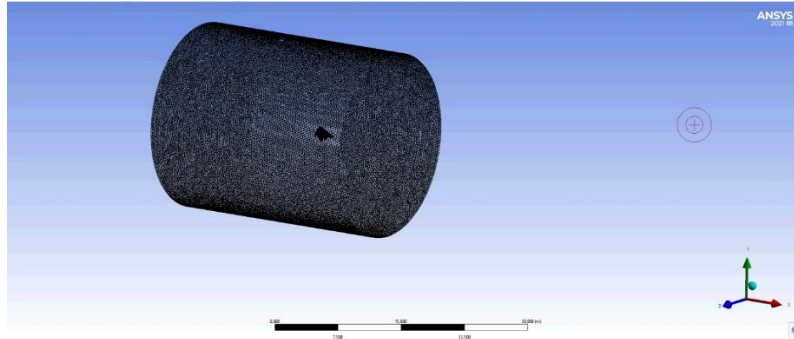
4.2.1 Domain dan Mesh Turbin Fibonacci

Domain simulasi turbin Fibonacci berbentuk silinder yang merepresentasikan kondisi aliran bebas di sekitar turbin. Bentuk domain silinder dipilih karena sesuai dengan karakteristik distribusi aliran yang simetris terhadap sumbu rotasi turbin. Domain kemudian didiskretisasi menjadi elemen-elemen kecil menggunakan proses *meshing* untuk memudahkan perhitungan numerik pada metode CFD. Dimensi domain yang digunakan meliputi diameter sebesar 20 m, dengan jarak *inlet* 8 m dan jarak *outlet* 16 m.



Gambar 4.3 Geometri Domain 1 Turbin Fibonacci
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Mesh dibuat cukup rapat untuk menangkap fenomena aliran di sekitar sudu turbin, dengan pepadatan pada area dekat permukaan karena terjadi interaksi langsung fluida struktur. Ukuran elemen pada turbin adalah 0,01 m, sedangkan pada domain 0,3 m. Total elemen yang dihasilkan sebesar 5.400.118.



Gambar 4. 4 Mesh Domain 1 Turbin Fibonacci
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

4.2.2 Domain dan Mesh Turbin Savonius

Pada turbin Savonius digunakan *Body of Influence* (BoI) dan metode *Fluent with Meshing (poly-hexa)* untuk menghasilkan mesh yang lebih adaptif pada area sudu. Turbin Savonius merupakan turbin tipe drag yang menghasilkan *flow separation*, *recirculation*, dan *wake* yang cukup besar sehingga membutuhkan resolusi mesh lebih halus di sekitar blade agar distribusi tekanan dan prediksi torsi lebih akurat. Elemen *poly-hexa* dikenal mampu memberikan akurasi baik pada geometri kompleks dengan jumlah elemen lebih efisien dibanding tetrahedral karena memiliki kualitas orthogonality dan numerical stability yang lebih baik (Lo et al., 2014).

Dimensi domain yang digunakan meliputi diameter sebesar 18 m, dengan jarak *inlet* 9 m dan jarak *outlet* 29 m.



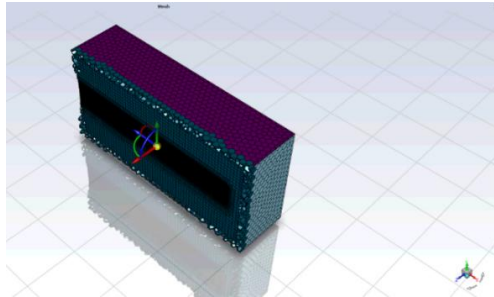
Gambar 4. 5 Geometri Domain 1 Turbin Savonius
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Penggunaan refinement lokal seperti BoI umum diterapkan pada simulasi *vertical axis wind turbine* karena meningkatkan akurasi prediksi performa tanpa meningkatkan biaya komputasi secara signifikan (Almohammadi et al., 2013).

Sebaliknya, turbin Fibonacci menggunakan metode *Fluid Flow (Fluent)* meshing tanpa BoI karena distribusi aliran di sekitar sudu relatif lebih gradual dan tidak menghasilkan *wake* sebesar turbin Savonius, sehingga mesh global sudah cukup merepresentasikan fenomena aliran dengan baik. Pemilihan metode meshing juga mempertimbangkan kompleksitas geometri dan

kebutuhan resolusi aliran; *mesh poly-hexa* lebih umum digunakan pada kasus dengan separasi aliran kuat, sedangkan mesh konvensional pada Fluent sudah memadai untuk aliran dengan gradien moderat (Ferziger & Perić, 2002; Roache, 1994). Oleh karena itu, penggunaan meshing tanpa *BoI* pada turbin Fibonacci dinilai cukup untuk memperoleh hasil simulasi yang stabil dan efisien secara komputasi.

Ukuran elemen pada turbin adalah 0,04 m, sedangkan pada *BoI* 0,59 m, dengan total elemen sebesar 9.876.231.



Gambar 4. 6 Mesh Domain 1 Turbin Savonius
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

4.2.3 Hasil RPM Turbin Fibonacci

Berdasarkan hasil simulasi CFD yang dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent, distribusi *tangential velocity* pada permukaan turbin (*surface turbine*) dapat dianalisis untuk setiap variasi kecepatan angin yang diuji. Analisis dilakukan dengan mengamati nilai *tangential velocity* maksimum yang terbentuk pada domain turbin, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar perhitungan kecepatan putar (RPM) turbin Fibonacci.

Pada kecepatan angin 2 m/s, hasil simulasi menunjukkan nilai *tangential velocity* maksimum sebesar 2,869 m/s pada permukaan turbin. Nilai ini mencerminkan komponen kecepatan fluida yang bekerja secara tangensial terhadap sumbu rotasi turbin, sehingga menghasilkan momen putar yang mendorong rotasi sudu. Berdasarkan nilai tersebut, kecepatan putar turbin yang diperoleh melalui perhitungan adalah sebesar 28 rev/min (RPM). Nilai ini mengindikasikan bahwa pada kecepatan angin rendah, turbin masih mampu berputar meskipun dengan intensitas rotasi yang relatif terbatas, sesuai dengan karakteristik turbin angin tipe *drag-lift* yang memerlukan energi kinetik angin minimum untuk memulai putaran.

Seiring dengan peningkatan kecepatan angin menjadi 3 m/s, terjadi kenaikan yang signifikan pada nilai *tangential velocity*, yakni menjadi 4,361 m/s. Peningkatan ini menunjukkan bahwa fluks momentum angin yang diterima oleh sudu turbin semakin besar, sehingga gaya tangensial yang dihasilkan pun meningkat secara proporsional. Konsekuensi langsung dari meningkatnya *tangential velocity* tersebut tercermin pada kecepatan putar turbin yang meningkat menjadi 42 rev/min. Fenomena ini selaras dengan prinsip mekanika fluida, di mana energi kinetik angin berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan aliran, sehingga peningkatan kecepatan angin sebesar 50% dari kondisi sebelumnya mampu mendorong peningkatan RPM yang cukup berarti.

Lebih lanjut, pada kecepatan angin 5 m/s, distribusi *tangential velocity* menunjukkan peningkatan yang lebih signifikan dibandingkan dua kondisi sebelumnya, dengan nilai mencapai 7,592 m/s. Tingginya nilai *tangential*

velocity pada kondisi ini mengindikasikan interaksi aerodinamis yang lebih intensif antara aliran angin dan profil sudu turbin Fibonacci, di mana geometri sudu yang mengadopsi rasio *golden ratio* berperan dalam mengoptimalkan penangkapan energi kinetik angin pada rentang kecepatan yang lebih tinggi. Kecepatan putar turbin pada kondisi ini mencapai 73 rev/min, yang merupakan nilai tertinggi dalam pengujian ini. Peningkatan RPM yang konsisten seiring bertambahnya kecepatan angin membuktikan bahwa desain turbin Fibonacci memiliki respons rotasi yang baik terhadap variasi kecepatan angin.

Secara keseluruhan, ketiga kondisi pengujian di atas memperlihatkan tren yang konsisten, di mana peningkatan kecepatan angin berbanding lurus dengan peningkatan *tangential velocity* maupun RPM turbin. Untuk memperjelas hubungan kuantitatif antara variabel-variabel tersebut, rekapitulasi hasil simulasi disajikan secara terstruktur dalam tabel berikut.

Tabel 4. 1 Hasil Tangential Velocity dan RPM Domain 1 Turbin Fibonacci

Hasil Tangential Velocity dan RPM Domain 1 Turbin Fibonacci					
Kecepatan Angin (m/s)	Ukuran Elemen		Total Elemen	Tangential Velocity	RPM (rev/min)
	Turbin (m)	Domain (m)			
2	0,01	0,3	5.400.118	2,869	28
3				4,361	42
5				7,592	73

Nilai RPM yang diperoleh dari simulasi domain 1 selanjutnya digunakan sebagai parameter input pada simulasi domain 2.

4.2.4 Hasil RPM Turbin Savonius

Selain turbin Fibonacci, simulasi CFD juga dilakukan terhadap turbin Savonius konvensional sebagai pembanding. Serupa dengan pendekatan yang digunakan sebelumnya, analisis distribusi tangential velocity pada permukaan turbin Savonius dilakukan pada tiga variasi kecepatan angin yang sama, sehingga perbandingan performa antara kedua desain turbin dapat dilakukan secara objektif dan terukur.

Pada kecepatan angin 2 m/s, hasil simulasi turbin Savonius menunjukkan nilai tangential velocity maksimum sebesar 2,458 m/s. Dibandingkan dengan turbin Fibonacci pada kondisi kecepatan angin yang sama, nilai ini lebih rendah, yang mengindikasikan bahwa kemampuan sudu turbin Savonius dalam mengonversi energi kinetik angin menjadi gerak tangensial relatif lebih kecil pada kecepatan angin rendah. Dari nilai tangential velocity tersebut, kecepatan putar turbin yang diperoleh adalah sebesar 23 rev/min, yang menggambarkan bahwa turbin Savonius telah mampu beroperasi pada kecepatan angin minimum ini, meskipun dengan respons rotasi yang lebih moderat dibandingkan turbin Fibonacci.

Ketika kecepatan angin ditingkatkan menjadi 3 m/s, nilai tangential velocity turbin Savonius meningkat menjadi 3,688 m/s, diikuti dengan kenaikan kecepatan putar menjadi 35 rev/min. Peningkatan ini berjalan secara konsisten dan mencerminkan karakteristik aerodinamis turbin Savonius yang responsif terhadap perubahan kecepatan angin. Meskipun demikian, selisih nilai tangential velocity antara turbin Savonius dan turbin Fibonacci pada kecepatan 3 m/s tetap terlihat, mengindikasikan bahwa pengaruh geometri sudu terhadap

efisiensi penangkapan energi angin mulai tampak lebih nyata seiring meningkatnya kecepatan aliran.

Pada kecepatan angin 5 m/s, nilai tangential velocity turbin Savonius mencapai 6,150 m/s dengan kecepatan putar sebesar 59 rev/min. Nilai ini merupakan yang tertinggi dalam pengujian turbin Savonius dan menunjukkan bahwa pada kecepatan angin yang lebih tinggi, turbin Savonius tetap mampu menghasilkan putaran yang cukup signifikan. Namun demikian, apabila dibandingkan dengan turbin Fibonacci yang mencapai tangential velocity 7,592 m/s dan RPM 73 rev/min pada kondisi yang sama, terdapat perbedaan yang cukup terlihat. Perbedaan ini diduga berkaitan dengan keunggulan geometri sudu turbin Fibonacci yang terinspirasi dari pola spiral golden ratio, sehingga mampu mengarahkan aliran angin secara lebih efektif dan menghasilkan gaya tangensial yang lebih besar.

Tren peningkatan tangential velocity dan RPM yang konsisten pada turbin Savonius di ketiga kondisi kecepatan angin tersebut mempertegas bahwa desain turbin ini memiliki karakteristik operasional yang stabil dan dapat diandalkan. Untuk memberikan gambaran yang lebih sistematis mengenai hasil simulasi turbin Savonius, keseluruhan data kuantitatif dirangkum dalam tabel berikut.

Tabel 4. 2 Hasil Tangential Velocity dan RPM Domain 1 Turbin Savonius

Hasil Tangential Velocity dan RPM Domain 1 Turbin Savonius					
Kecepatan Angin (m/s)	Ukuran Elemen		Total Elemen	Tangential Velocity	RPM (rev/min)
	Turbin (m)	BoI (m)			
2	0,04	0,59	9.876.231	2,458	23
3				3,688	35
5				6,150	59

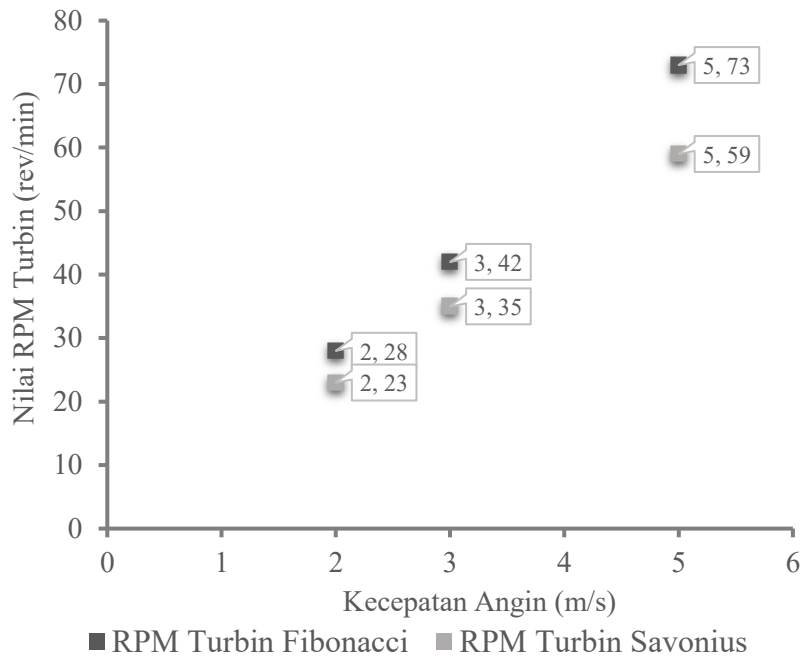
4.2.5 Perbandingan RPM Turbin

Nilai RPM yang diperoleh dari hasil simulasi pada masing-masing variasi kecepatan angin kemudian dibandingkan untuk melihat pengaruh perbedaan geometri terhadap kemampuan turbin dalam berputar. Perbandingan nilai RPM turbin Fibonacci dan Savonius disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Perbandingan RPM Turbin

Perbandingan RPM Turbin		
Kecepatan Angin (m/s)	RPM Turbin Fibonacci (rev/min)	RPM Turbin Savonius (rev/min)
2	28	23
3	42	35
5	73	59

Berdasarkan Tabel 4.3, terlihat bahwa peningkatan kecepatan angin menyebabkan peningkatan nilai RPM pada kedua turbin. Hubungan antara kecepatan angin dan RPM turbin ditunjukkan lebih jelas pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan RPM Turbin Fibonacci dan Savonius
(Sumber: Perhitungan Ms. Excel)

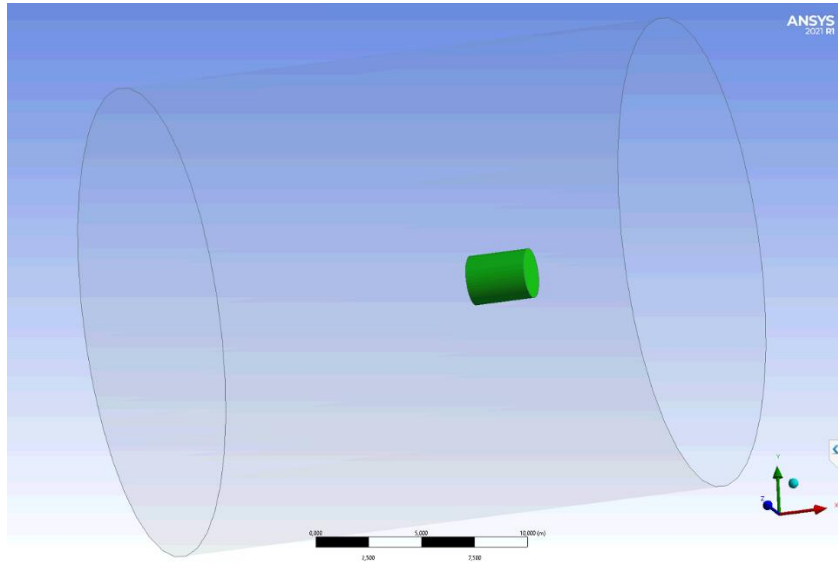
4.3 Simulasi Domain 2 dengan Rotor Zone untuk Perhitungan Torsi

Simulasi domain 2 dilakukan untuk memperoleh karakteristik performa turbin berupa distribusi tekanan, pola aliran, dan nilai torsi. Pada domain ini digunakan pendekatan *Multiple Reference Frame (MRF)* dengan penambahan *rotor zone* untuk merepresentasikan daerah berputar di sekitar turbin. Nilai RPM hasil simulasi domain 1 digunakan sebagai parameter kecepatan rotasi pada *rotor zone*.

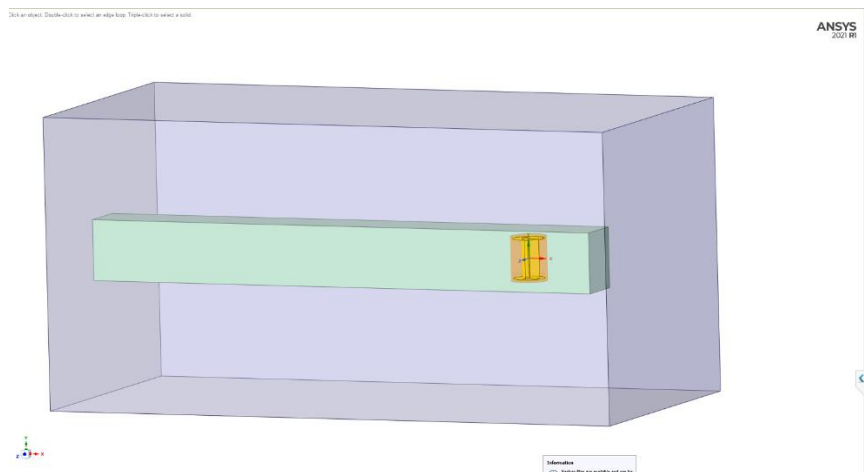
Variasi kecepatan angin sebesar 2 m/s, 3 m/s, dan 5 m/s diterapkan pada *boundary inlet* untuk masing-masing turbin.

4.3.1 Domain dan Rotor Zone Turbin Fibonacci

Domain simulasi turbin Fibonacci tetap berbentuk silinder, sedangkan turbin Savonius menggunakan domain berbentuk balok. Pada kedua domain tersebut ditambahkan *rotor zone* berbentuk silinder yang berfungsi sebagai area rotasi turbin.



Gambar 4. 8 Geometri Domain 2 dengan RotorZone Turbin Fibonacci
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)



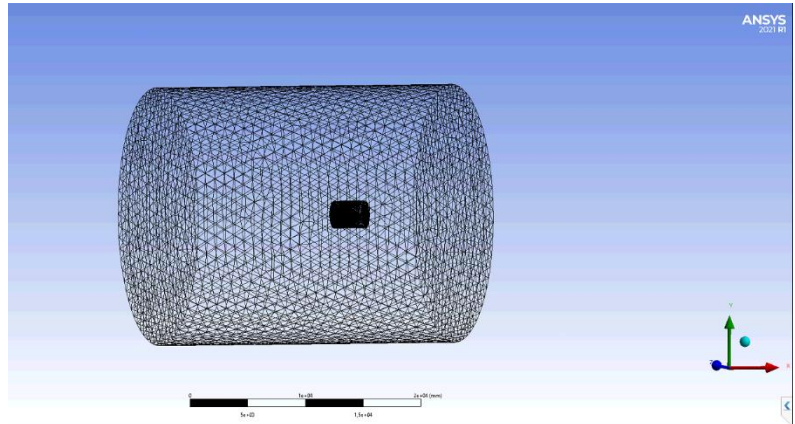
Gambar 4. 9 Geometri Domain 2 dengan RotorZone Turbin Savonius
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

4.3.2 Mesh Domain 2

Mesh domain 2 digunakan untuk membagi domain simulasi agar perhitungan aliran fluida dapat dilakukan secara numerik. Kerapatan mesh difokuskan pada rotor zone karena area ini merupakan lokasi utama perpindahan energi dari fluida ke turbin.

A. Mesh Domain 2 Turbin Fibonacci

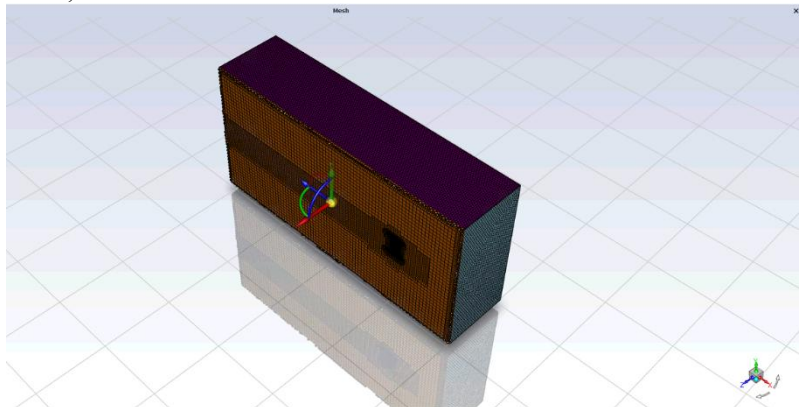
Pada turbin Fibonacci, ukuran elemen pada turbin sebesar 0,01 m. Sementara itu, pada *rotor zone* digunakan ukuran 0,3 m dan pada domain 1 m. Konfigurasi ini menghasilkan total elemen sebanyak 4.681.330.



Gambar 4. 10 Mesh Domain 2 Turbin Fibonacci
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

B. Mesh Domain 2 Turbin Savonius

Pada turbin Savonius, proses *meshing* menggunakan metode *Fluent with Meshing (Poly-Hexa)* untuk meningkatkan kualitas elemen. Ukuran elemen pada turbin sebesar 0,015 m, sedangkan pada area *BoI* sebesar 0,3 m.



Gambar 4. 11 Mesh Domain 2 Turbin Savonius
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

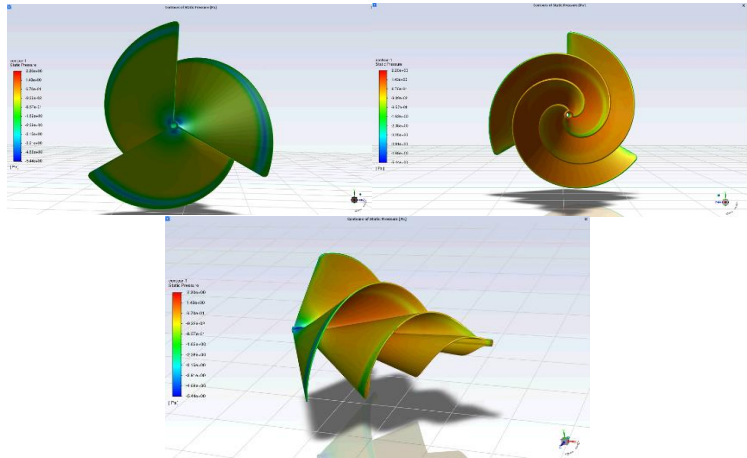
Nilai *skewness mesh* sebesar 0,80 menunjukkan kualitas *mesh* masih dalam batas yang dapat diterima. Dengan pengaturan ini, total elemen yang dihasilkan adalah 1.232.815.

4.3.3 Distribusi Tekanan Pada Turbin

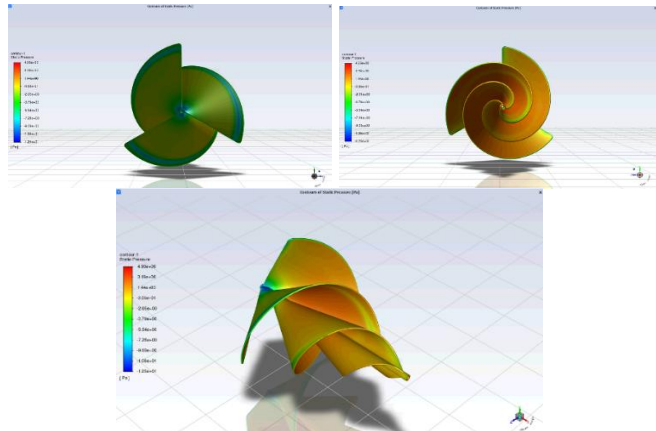
Setelah proses *running* mencapai kondisi stabil, hasil simulasi dianalisis melalui visualisasi distribusi tekanan, dan nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin pada masing-masing variasi kecepatan angin.

A. Kontur Tekanan Turbin Fibonacci

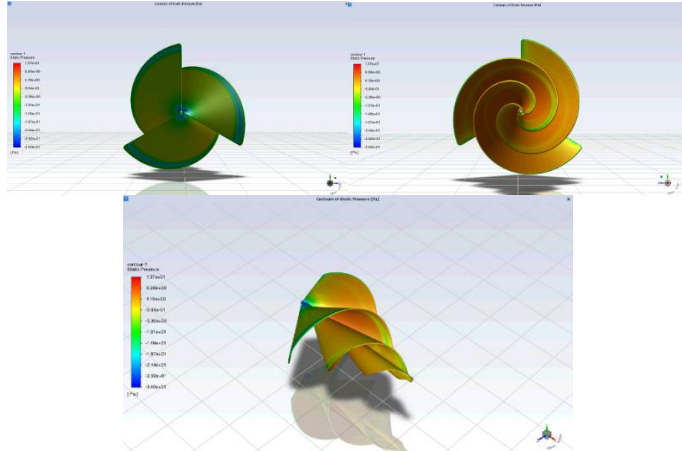
Kontur distribusi tekanan pada turbin Fibonacci untuk kecepatan angin 2 m/s, 3 m/s, dan 5 m/s ditunjukkan pada Gambar 4.18., Gambar 4.19. dan Gambar 4.20.



Gambar 4. 12 Kontur Tekanan Domain 2 Turbin Fibonacci Pada Kecepatan Angin 2 m/s
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)



Gambar 4. 13 Kontur Tekanan Domain 2 Turbin Fibonacci Pada Kecepatan Angin 3 m/s
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)



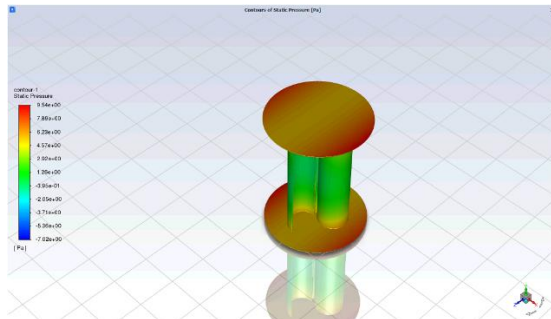
Gambar 4. 14 Kontur Tekanan Domain 2 Turbin Fibonacci Pada Kecepatan Angin 5 m/s
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Distribusi tekanan menunjukkan adanya perbedaan tekanan antara sisi bilah yang berhadapan langsung dengan aliran angin dan sisi yang berada di belakang bilah.

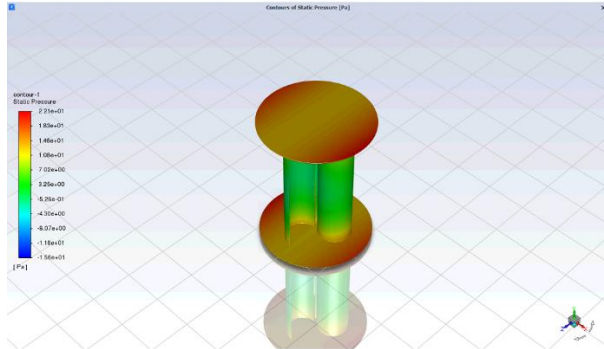
Peningkatan kecepatan angin menyebabkan peningkatan perbedaan tekanan pada permukaan bilah, yang menunjukkan adanya peningkatan gaya aerodinamis yang bekerja pada turbin.

B. Kontur Tekanan Turbin Savoius

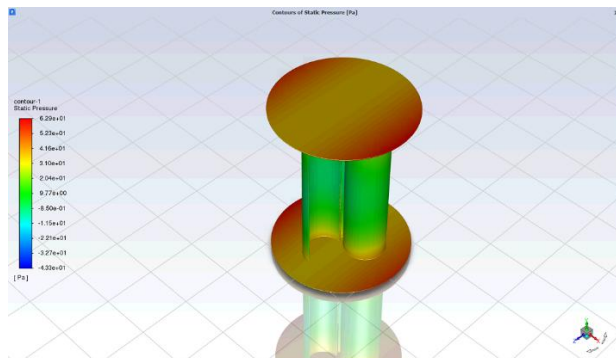
Kontur distribusi tekanan pada turbin Savonius untuk kecepatan angin 2 m/s, 3 m/s, dan 5 m/s ditunjukkan pada Gambar 4.21., Gambar 4.22. dan Gambar 4.23.



Gambar 4. 15 Kontur Tekanan Domain 2 Turbin Savoius Pada Kecepatan Angin 2 m/s
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)



Gambar 4. 16 Kontur Tekanan Domain 2 Turbin Savonius Pada Kecepatan Angin 3 m/s
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)



Gambar 4. 17 Kontur Tekanan Domain 2 Turbin Savonius Pada Kecepatan Angin 5 m/s
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Semakin besar kecepatan angin, perbedaan tekanan yang terjadi pada permukaan bilah semakin meningkat sehingga berpengaruh terhadap kemampuan turbin dalam menghasilkan gaya putar.

4.3.4 Hasil Torsi Turbin

Nilai torsi diperoleh dari hasil simulasi pada domain 2 melalui monitor momen pada sumbu rotasi turbin. Nilai torsi yang dihasilkan menunjukkan kemampuan turbin dalam mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik berupa putaran.

Nilai torsi dihitung untuk masing-masing turbin pada kecepatan angin 2 m/s, 3 m/s, dan 5 m/s. Hasil torsi yang diperoleh kemudian digunakan untuk menganalisis performa turbin serta membandingkan karakteristik kedua jenis turbin.

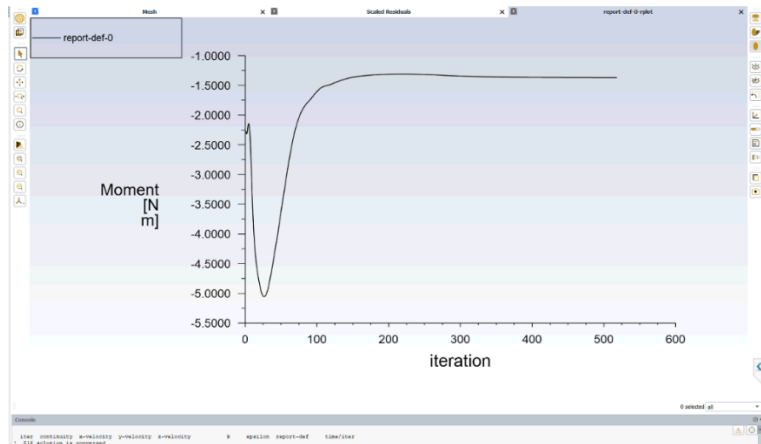
A. Torsi Turbin Fibonacci

Nilai torsi turbin Fibonacci pada masing-masing variasi kecepatan angin ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil Torsi Turbi Fibonacci

Hasil Torsi Turbin Fibonacci						
Kecepatan Angin (m/s)	Ukuran Elemen (<i>Meshing</i>)			Total Elemen (<i>Meshing</i>)	Konvergen di Iterasi	Torsi (N/m)
	Blade (m)	RotorZone (m)	Domain (m)			
2	0,01	0,3	1	4.681.330	518	1,372
3					559	3,120
5					554	8,295

Berdasarkan hasil simulasi, peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.24., Gambar 4.25., dan Gambar 4.26.

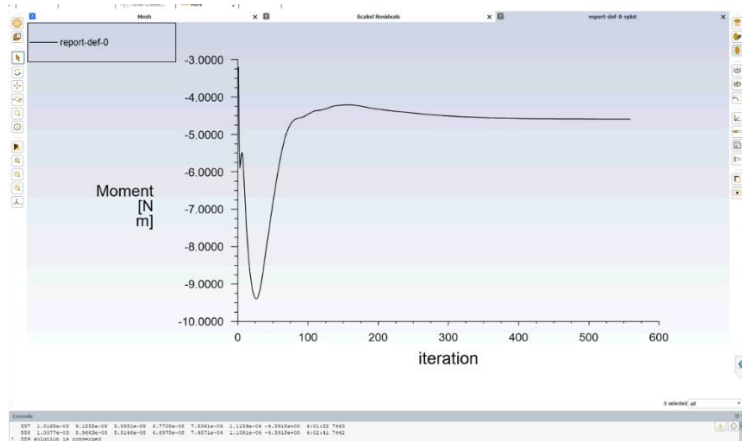


Gambar 4. 18 Grafik Torsi Domain 2 Turbin Fibonacci Pada Kecepatan Angin 2 m/s
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Pada kecepatan angin 2 m/s, simulasi berhasil mencapai konvergensi pada iterasi ke-518 dengan nilai torsi yang diperoleh sebesar 0,262 N·m. Grafik konvergensi momen pada kondisi ini memperlihatkan pola yang khas, di mana pada iterasi-iterasi awal nilai momen mengalami penurunan tajam hingga mencapai titik minimum sekitar $-5,000 \text{ N}\cdot\text{m}$ pada iterasi ke-30 hingga 40. Penurunan awal yang signifikan ini merupakan fenomena transien numerik yang lazim terjadi pada simulasi CFD, di mana solver sedang dalam proses menyeimbangkan distribusi tekanan dan kecepatan aliran di seluruh domain komputasi. Setelah melewati titik minimum tersebut, nilai momen berangsur-angsur meningkat dan menstabilkan diri pada nilai konvergen di sekitar $-1,500 \text{ N}\cdot\text{m}$. Kestabilan kurva yang terlihat mulai iterasi ke-200 hingga akhir simulasi mengindikasikan bahwa solusi numerik telah mencapai kondisi steady-state, sehingga nilai torsi yang diambil pada sumbu $z = -1$ sebesar $0,262 \text{ N}\cdot\text{m}$ dapat dianggap representatif terhadap kondisi operasional turbin pada kecepatan angin rendah tersebut.

Meningkatnya kecepatan angin menjadi 3 m/s memberikan pengaruh yang nyata terhadap besaran torsi yang dihasilkan turbin Fibonacci. Simulasi pada kondisi ini mencapai konvergensi pada

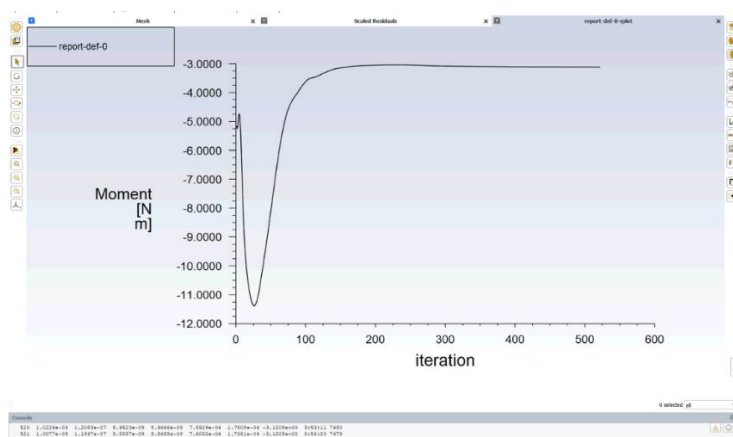
iterasi ke-559 dengan nilai torsi sebesar $0,589 \text{ N}\cdot\text{m}$, atau meningkat sekitar $124,8\%$ dibandingkan kondisi kecepatan angin 2 m/s . Grafik konvergensi momen pada kecepatan 3 m/s menunjukkan pola yang serupa dengan kondisi sebelumnya, namun dengan amplitudo yang lebih besar. Nilai momen pada iterasi-iterasi awal turun secara drastis hingga mencapai titik minimum di sekitar $-9,500 \text{ N}\cdot\text{m}$, yang lebih dalam dibandingkan kondisi 2 m/s . Hal ini mencerminkan intensitas gaya fluida yang lebih besar akibat meningkatnya momentum aliran angin. Selanjutnya, kurva momen mengalami pemulihan secara bertahap dan akhirnya menstabilkan diri pada nilai konvergen di sekitar $-4,500 \text{ N}\cdot\text{m}$. Lonjakan torsi yang signifikan pada kecepatan ini mengindikasikan bahwa geometri sudu turbin Fibonacci mulai bekerja secara lebih optimal dalam menangkap dan mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik rotasional.



Gambar 4. 19 Grafik Torsi Domain 2 Turbin Fibonacci Pada Kecepatan Angin 3 m/s
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Pada kecepatan angin 5 m/s yang ditampilkan pada Gambar 4.26, turbin Fibonacci mencatat nilai torsi tertinggi dalam pengujian ini, yaitu sebesar $1,701 \text{ N}\cdot\text{m}$, dengan konvergensi yang dicapai pada iterasi ke-554. Nilai torsi ini meningkat sekitar $188,8\%$ dibandingkan kondisi kecepatan 3 m/s , dan secara keseluruhan meningkat hampir 549% dibandingkan kecepatan angin 2 m/s . Grafik konvergensi momen pada kondisi ini memperlihatkan penurunan awal yang paling dalam di antara ketiga kondisi pengujian, dengan nilai minimum menyentuh sekitar $-11,500 \text{ N}\cdot\text{m}$ pada iterasi awal. Fenomena ini konsisten dengan meningkatnya gaya aerodinamis yang bekerja pada sudu turbin seiring dengan peningkatan kuadrat kecepatan angin, sebagaimana dinyatakan dalam hukum daya angin. Setelah fase transien awal, kurva momen menunjukkan pemulihan yang stabil dan konvergen pada nilai sekitar $-3,000 \text{ N}\cdot\text{m}$, dengan profil kestabilan yang sangat baik dari iterasi ke-300 hingga akhir simulasi. Peningkatan torsi yang substansial pada kecepatan 5 m/s ini mempertegas bahwa desain turbin Fibonacci memiliki kemampuan ekstraksi energi yang semakin efektif seiring bertambahnya

kecepatan angin, selaras dengan prinsip bahwa daya yang tersedia dalam aliran angin berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatan anginnya.



Gambar 4. 20 Grafik Torsi Domain 2 Turbin Fibonacci Pada Kecepatan Angin 5 m/s (Sumber: Dokumentasi Pribadi)

- B. Torsi Turbin Savonius
 Nilai torsi turbin Savonius pada masing-masing variasi kecepatan angin ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Hasil Torsi Turbin Savonius

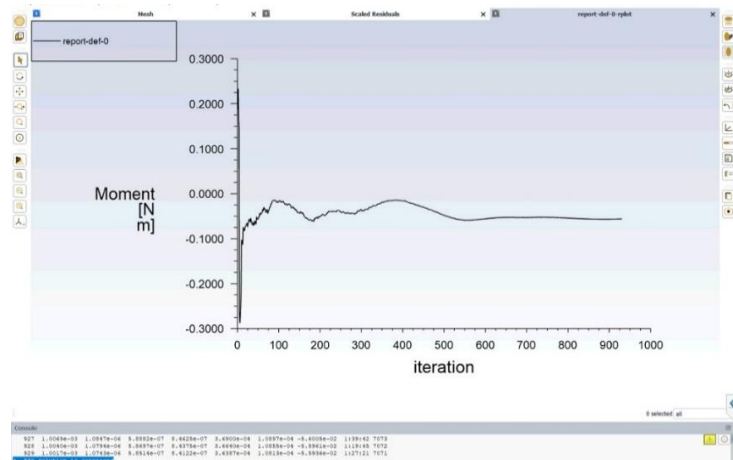
Hasil Torsi Turbin Savonius					
Kecepatan Angin (m/s)	Ukuran Elemen (<i>Meshing</i>)		Total Elemen (<i>Meshing</i>)	Konvergen di Iterasi	Torsi (N/m)
	Blade (m)	BoI (m)			
2	0,015	0,3	1.232.815	930	0,056
3				1.118	0,125
5				1.282	0,339

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin berpengaruh terhadap peningkatan nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin. Grafik Torsi setiap kecepatan dapat dilihat pada Gambar 4.27., Gambar 4.28., dan Gambar 4.29.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin berpengaruh secara langsung terhadap peningkatan nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin Savonius. Karakteristik konvergensi pada turbin Savonius memperlihatkan pola yang berbeda dibandingkan turbin Fibonacci, sebagaimana dapat diamati pada grafik momen berikut. Perbedaan perilaku konvergensi ini erat kaitannya dengan perbedaan geometri sudu serta kompleksitas interaksi aerodinamis yang terjadi pada masing-masing desain turbin.

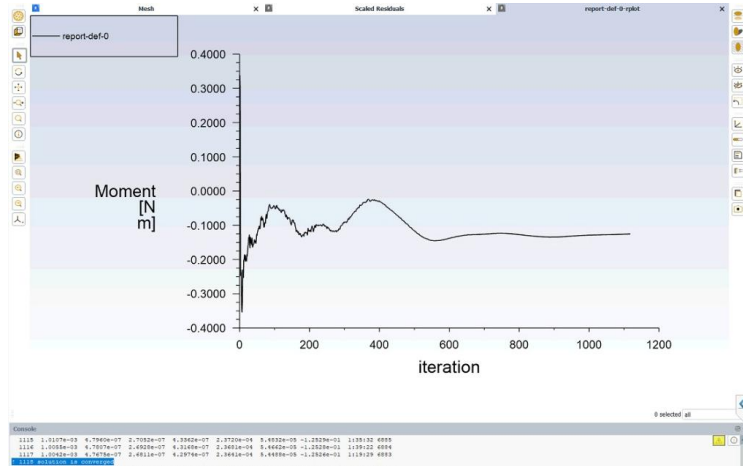
Pada kecepatan angin 2 m/s, simulasi turbin Savonius mencapai konvergensi pada iterasi ke-930 dengan nilai torsi sebesar 0,056 Nm. Jumlah iterasi yang diperlukan hingga konvergensi jauh lebih besar dibandingkan turbin Fibonacci pada kecepatan yang sama, yang

mengindikasikan bahwa aliran fluida di sekitar sudu turbin Savonius memerlukan lebih banyak tahapan komputasi untuk mencapai kondisi steady-state. Grafik konvergensi momen pada kondisi ini memperlihatkan karakteristik yang khas, di mana pada iterasi-iterasi awal nilai momen berfluktuasi di sekitar 0,000 hingga $-0,100$ Nm dengan osilasi yang cukup terlihat antara iterasi ke-50 hingga ke-400. Fluktuasi ini mencerminkan adanya efek interferensi aliran antara sudu maju (*advancing blade*) dan sudu mundur (*returning blade*) yang merupakan karakteristik inheren dari turbin tipe Savonius. Setelah melewati fase osilasi tersebut, kurva momen berangsur-angsur menstabilkan diri dan konvergen pada nilai sekitar $-0,075$ Nm menjelang akhir simulasi. Nilai torsi yang relatif kecil pada kecepatan angin rendah ini menggambarkan keterbatasan turbin Savonius dalam mengekstraksi energi kinetik angin secara optimal pada rentang kecepatan rendah.



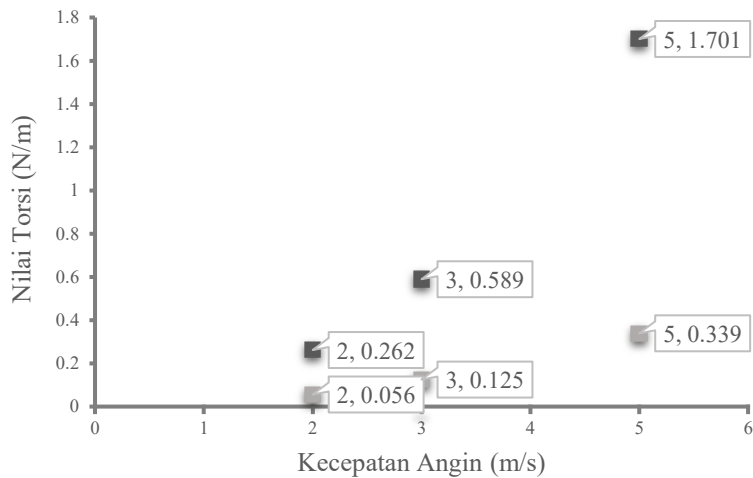
Gambar 4. 21 Grafik Torsi Domain 2 Turbin Savonius Pada Kecepatan Angin 2 m/s
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Pada kecepatan angin 3 m/s, nilai torsi turbin Savonius meningkat menjadi 0,125 Nm, dengan konvergensi yang dicapai pada iterasi 1.118. Peningkatan torsi sebesar sekitar 123,2% dibandingkan kondisi 2 m/s menunjukkan respons yang proporsional terhadap peningkatan energi kinetik angin. Grafik konvergensi momen pada kondisi ini memperlihatkan pola osilasi yang lebih kompleks dibandingkan kecepatan 2 m/s, dengan fluktuasi nilai momen yang lebih lebar pada rentang iterasi awal hingga sekitar iterasi ke-450. Nilai momen sempat turun hingga sekitar $-0,200$ Nm pada iterasi awal sebelum mengalami pemulihan bertahap. Osilasi yang lebih intens ini mencerminkan meningkatnya intensitas interaksi aerodinamis antara sudu turbin dan aliran angin yang lebih kuat, di mana fenomena separasi aliran dan pembentukan pusaran (*vortex*) di belakang sudu menjadi lebih dominan. Kurva akhirnya menstabilkan diri pada nilai konvergen sekitar $-0,125$ Nm, mengindikasikan bahwa solusi numerik telah merepresentasikan kondisi operasional turbin secara memadai.



Gambar 4. 22 Grafik Torsi Domain 2 Turbin Savonius Pada Kecepatan Angin 3 m/s
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Pada kecepatan angin 5 m/s, turbin Savonius mencatat nilai torsi tertinggi dalam pengujian ini, yaitu sebesar 0,339 Nm, dengan konvergensi yang baru tercapai pada iterasi ke-1.282. Jumlah iterasi terbesar di antara ketiga kondisi pengujian ini mengindikasikan kompleksitas aliran yang semakin tinggi pada kecepatan angin yang lebih besar. Grafik konvergensi momen pada kondisi ini menampilkan karakteristik yang paling dinamis, dengan osilasi yang berlangsung cukup panjang hingga sekitar iterasi ke-500 sebelum kurva mulai menstabilkan diri. Nilai momen pada fase transien awal sempat mencapai titik minimum di sekitar $-1,000$ Nm, jauh lebih dalam dibandingkan dua kondisi sebelumnya, yang mencerminkan besarnya gaya hidrodinamis yang bekerja pada sudu akrobat meningkatnya momentum aliran. Kurva kemudian konvergen secara stabil pada nilai sekitar $-0,350$ Nm menjelang akhir simulasi. Meskipun peningkatan torsi pada kecepatan 5 m/s cukup signifikan, yakni sekitar 171,2% dibandingkan kecepatan 3 m/s, nilai torsi turbin Savonius secara keseluruhan masih berada di bawah nilai yang dihasilkan turbin Fibonacci pada setiap kondisi kecepatan angin yang diuji. Hal ini mengindikasikan bahwa geometri sudu turbin Fibonacci lebih unggul dalam mengonversi energi kinetik angin menjadi torsi rotasional, terutama karena pola spiral berbasis golden ratio pada sudu Fibonacci memungkinkan penangkapan dan pengarahan aliran angin yang lebih efisien dibandingkan profil sudu setengah silinder pada turbin Savonius konvensional.



Gambar 4. 24 Grafik Perbandingan Nilai Torsi Turbin Fibonacci dan Savonius
(Sumber: Perhitungan Ms. Excel)

Perbedaan nilai torsi yang dihasilkan menunjukkan bahwa geometri turbin mempengaruhi karakteristik interaksi aliran dan kemampuan turbin dalam menghasilkan energi mekanik.

4.4 Analisis Performa Turbin

Analisis performa turbin dilakukan berdasarkan nilai RPM hasil simulasi domain 1 dan nilai torsi hasil simulasi domain 2. Parameter performa yang dianalisis meliputi *Tip Speed Ratio* (TSR), *coefficient of torque* (Ct), dan *coefficient of power* (Cp). Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi kemampuan turbin dalam mengkonversi energi angin menjadi energi mekanik.

Perhitungan performa dilakukan pada variasi kecepatan angin 2 m/s, 3 m/s, dan 5 m/s untuk turbin Fibonacci dan Savonius. Hasil perhitungan kemudian dibandingkan untuk mengetahui karakteristik performa masing-masing turbin.

4.4.1 Tip Speed Ratio (TSR)

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan ujung bilah turbin dengan kecepatan angin. Nilai TSR menunjukkan karakteristik kecepatan putaran turbin terhadap aliran angin yang mengenainya.

Nilai TSR dihitung menggunakan persamaan:

$$TSR = (\omega R) / V$$

dimana:

ω = kecepatan sudut turbin (rad/s)

R = jari-jari turbin (m)

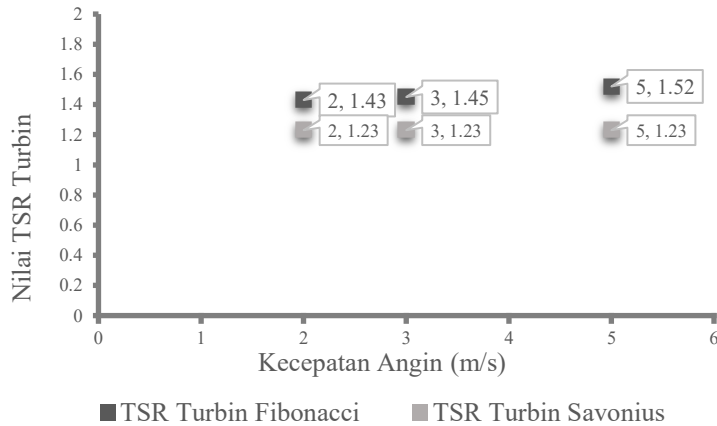
V = kecepatan angin (m/s)

Dari hasil perhitungan menggunakan rumus tersebut nilai TSR turbin Fibonacci dan Savonius pada masing-masing variasi kecepatan angin ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan TSR Turbin Fibonacci dan Savonius

Hasil Perhitungan TSR Turbin Fibonacci dan Savonius		
Kecepatan Angin (m/s)	TSR Turbin Fibonacci	TSR Turbin Savonius
2	1,43	1,23
3	1,45	1,23
5	1,52	1,23

Berdasarkan Tabel 4.7, nilai TSR menunjukkan perubahan seiring dengan meningkatnya kecepatan angin. Hubungan antara TSR dan kecepatan angin ditunjukkan pada Gambar 4.31.



Gambar 4. 25 Grafik TSR Terhadap Kecepatan Angin
(Sumber: Perhitungan Ms. Excel)

4.4.2 Coefficient of Torque (Ct)

Coefficient of torque (Ct) menunjukkan kemampuan turbin dalam menghasilkan torsi akibat interaksi antara aliran angin dan geometri turbin. Nilai Ct dihitung berdasarkan nilai torsi hasil simulasi domain 2.

Ct dihitung menggunakan persamaan:

$$Ct = T / (0,5 \rho A R V^2)$$

dimana:

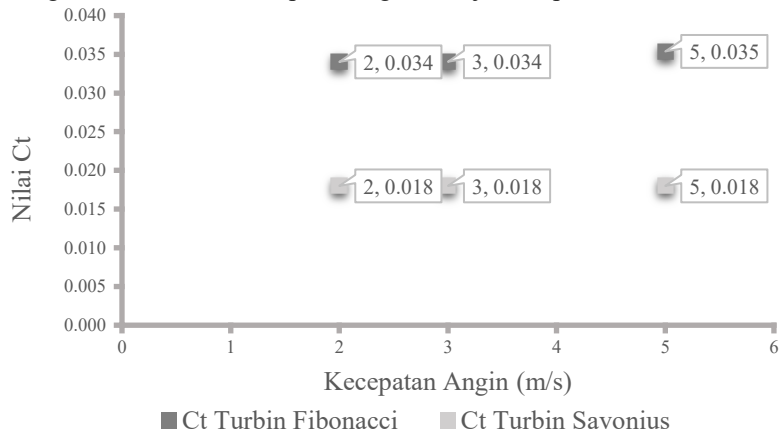
- T = torsi turbin (Nm)
- ρ = densitas udara (kg/m³)
- A = luas sapuan turbin (m²)
- R = jari-jari turbin (m)
- V = kecepatan angin (m/s)

Nilai Ct pada masing-masing variasi kecepatan angin ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Nilai Ct Turbin Fibonacci dan Savonius

Nilai Ct Turbin Fibonacci dan Savonius		
Kecepatan Angin (m/s)	Ct Turbin Fibonacci	Ct Turbin Savonius
2	0,175	0,018
3	0,178	0,018
5	0,171	0,018

Hubungan antara Ct dan kecepatan angin ditunjukkan pada Gambar 4.32.



Gambar 4. 26 Grafik Ct Terhadap Kecepatan Angin
(Sumber: Perhitungan Ms. Excel)

4.4.3 Coefficient of Power (Cp)

Coefficient of power (Cp) merupakan parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi performa turbin angin dalam mengkonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Nilai Cp menunjukkan efisiensi turbin dalam memanfaatkan energi angin.

Nilai Cp dihitung menggunakan persamaan:

$$C_p = (T \omega) / (0,5 \rho A V^3)$$

dimana:

T = torsi turbin (Nm)

ω = kecepatan sudut turbin (rad/s)

ρ = densitas udara (kg/m³)

A = luas sapuan turbin (m²)

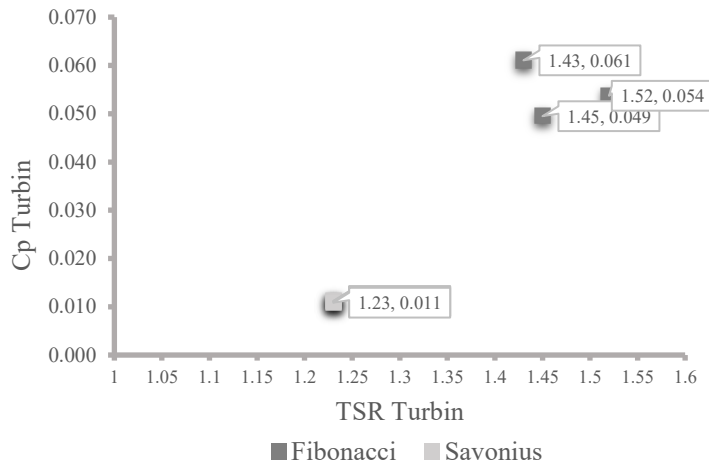
V = kecepatan angin (m/s)

Nilai Cp turbin Fibonacci dan Savonius ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Nilai Cp Turbin Fibonacci dan Savonius

Nilai Cp Turbin Fibonacci dan Savonius		
Kecepatan Angin (m/s)	Cp Turbin Fibonacci	Cp Turbin Savonius
2	0,061	0,011
3	0,049	0,011
5	0,054	0,011

Hubungan antara C_p dan TSR ditunjukkan pada Gambar 4.33.



Gambar 4. 27 Grafik C_p Terhadap TSR
(Sumber: Perhitungan Ms. Excel)

Grafik C_p terhadap TSR digunakan untuk mengidentifikasi kondisi performa optimum turbin. Nilai C_p yang lebih besar menunjukkan kemampuan turbin yang lebih baik dalam mengkonversi energi angin.

4.4.4 Perbandingan Performa Turbin Fibonacci dan Savonius

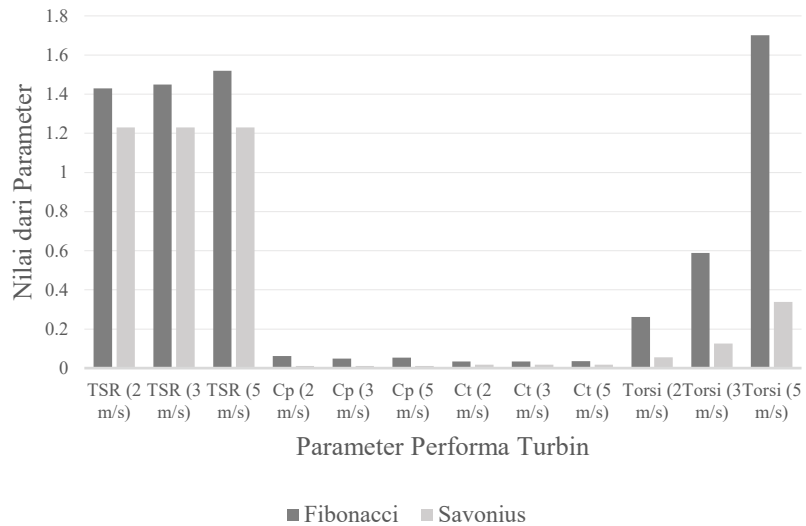
Untuk mempermudah analisis perbedaan performa, nilai *Tip Speed Ratio* (TSR), torsi, dan *Coefficient of Power* (C_p) dari kedua turbin dibandingkan secara langsung pada masing-masing variasi kecepatan angin. Data hasil simulasi kemudian disusun dalam bentuk tabel perbandingan sebagai dasar pembuatan grafik hubungan C_p terhadap TSR.

Tabel perbandingan ini menunjukkan kecenderungan performa masing-masing turbin dalam mengkonversi energi angin menjadi energi mekanik. Selanjutnya, grafik C_p terhadap TSR digunakan untuk memperjelas perbedaan karakteristik performa antara turbin Fibonacci dan Savonius pada setiap kondisi kecepatan angin.

Tabel 4. 10 Perbandingan C_p , C_t , TSR, dan Torsi

Parameter	Fibonacci	Savonius
TSR (2 m/s)	1,43	1,23
TSR (3 m/s)	1,45	1,23
TSR (5 m/s)	1,52	1,23
C_p (2 m/s)	0,06	0,011
C_p (3 m/s)	0,049	0,011
C_p (5 m/s)	0,054	0,011
C_t (2 m/s)	0,034	0,018
C_t (3 m/s)	0,034	0,018
C_t (5 m/s)	0,035	0,018
Torsi (2 m/s)	0,262	0,056
Torsi (3 m/s)	0,589	0,125
Torsi (5 m/s)	1,701	0,339

Berdasarkan Tabel 4.10, terlihat adanya perbedaan nilai parameter performa antara turbin Fibonacci dan Savonius pada setiap variasi kecepatan angin. Untuk memperjelas perbandingan tersebut, data divisualisasikan dalam bentuk grafik sehingga kecenderungan performa masing-masing turbin dapat diamati secara lebih jelas.



Gambar 4. 28 Grafik Perbandingan Parameter Performa Turbin pada Setiap Kecepatan Angin
(Sumber: Perhitungan Ms. Excel)

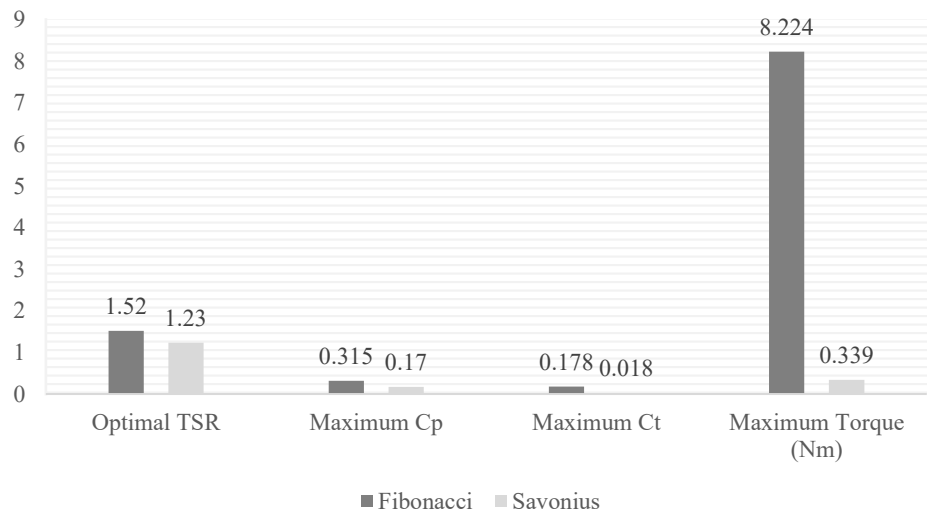
Untuk menentukan kondisi performa terbaik dari masing-masing turbin, dilakukan pengkerucutan data dengan memilih nilai parameter yang paling optimal pada setiap turbin. Parameter yang digunakan sebagai acuan meliputi nilai Cp maksimum sebagai indikator efisiensi energi, Ct sebagai representasi kemampuan menghasilkan torsi, serta nilai torsi maksimum yang menunjukkan besarnya energi mekanik yang dihasilkan turbin.

Pemilihan parameter optimum didasarkan pada prinsip bahwa performa turbin angin umumnya dievaluasi berdasarkan nilai *coefficient of power* (Cp), karena Cp menunjukkan seberapa besar energi kinetik angin yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik oleh turbin. Semakin tinggi nilai Cp, maka semakin efisien turbin dalam memanfaatkan energi angin (Burton et al., 2011; Manwell et al., 2009).

Tabel 4. 11 Performa Optimum Turbin

Parameter	Fibonacci	Savonius
TSR optimum	1,52	1,23
Cp maksimum	0,061	0,11
Ct maksimum	0,035	0,018
Torsi maksimum (Nm)	1,701	0,339

Untuk memperjelas perbandingan performa optimum kedua turbin, data kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



Gambar 4. 29 Grafik Perbandingan Performa Optimum Turbin
(Sumber: Perhitungan Ms. Excel)

Penentuan performa optimum masing-masing turbin dilakukan dengan mempertimbangkan parameter *Tip Speed Ratio* (TSR), *Coefficient of Power* (Cp), *Coefficient of Torque* (Ct), dan torsi yang dihasilkan pada setiap variasi kecepatan angin. Keempat parameter tersebut digunakan karena saling merepresentasikan karakteristik utama performa turbin angin, yaitu kesesuaian rasio kecepatan putar (TSR), kemampuan menghasilkan gaya putar (Ct), efisiensi konversi energi (Cp), serta besarnya energi mekanik yang dihasilkan (torsi) (Burton et al., 2011; Manwell et al., 2009).

Berdasarkan Tabel 4.11 dan Gambar 4.35, turbin Fibonacci menunjukkan nilai Cp maksimum sebesar 0,061 yang diperoleh pada kecepatan angin 2 m/s, mengindikasikan bahwa efisiensi konversi energi paling optimal terjadi pada kondisi kecepatan angin rendah tersebut. Nilai TSR turbin Fibonacci berada pada rentang 1,43 hingga 1,52 di seluruh kondisi pengujian, yang mencerminkan kestabilan rasio kecepatan putar terhadap variasi kecepatan angin. Kestabilan TSR ini menunjukkan bahwa geometri sudu turbin Fibonacci mampu mempertahankan karakteristik putaran yang konsisten meskipun kecepatan angin berubah. Nilai Ct turbin Fibonacci juga relatif stabil pada kisaran 0,034 hingga 0,035, yang mengindikasikan kemampuan turbin dalam menghasilkan gaya putar yang merata di seluruh rentang kecepatan yang diuji. Sementara itu, torsi maksimum sebesar 1,701 Nm diperoleh pada kecepatan angin 5 m/s, yang menunjukkan peningkatan energi mekanik yang konsisten seiring bertambahnya kecepatan aliran fluida. Hal ini selaras dengan teori bahwa daya angin berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatan angin, sehingga peningkatan kecepatan angin menghasilkan gaya putar yang lebih besar pada turbin (Burton et al., 2011).

Pada turbin Savonius, nilai TSR cenderung konstan pada 1,23 di seluruh variasi kecepatan angin yang diuji. Kekonstanan TSR ini merupakan karakteristik khas turbin berbasis *drag* yang memiliki rasio kecepatan putar relatif rendah dibandingkan turbin dengan prinsip *lift* (Akwa et al., 2012). Nilai Ct turbin Savonius sebesar 0,018 pada seluruh kondisi pengujian menunjukkan

kemampuan menghasilkan gaya putar yang lebih kecil dibandingkan turbin Fibonacci, dan nilai yang tidak berubah ini mengindikasikan bahwa geometri sudu setengah silinder pada turbin Savonius menghasilkan distribusi gaya tangensial yang relatif seragam terlepas dari perubahan kecepatan angin. Nilai C_p turbin Savonius juga tercatat konstan pada 0,011 di seluruh variasi kecepatan, yang menunjukkan keterbatasan efisiensi konversi energi pada desain turbin ini. Nilai torsi maksimum sebesar 0,339 Nm diperoleh pada kecepatan angin 5 m/s, yang menunjukkan adanya peningkatan gaya dorong fluida terhadap permukaan sudu turbin seiring meningkatnya momentum aliran. Karakteristik ini sesuai dengan prinsip kerja turbin Savonius yang memanfaatkan gaya drag sebagai penggerak utama, di mana perbedaan tekanan antara sisi cekung dan sisi cembung sudu menjadi sumber utama torsi yang dihasilkan (Roy & Saha, 2013).

Secara keseluruhan, turbin Fibonacci menunjukkan performa yang lebih unggul dibandingkan turbin Savonius berdasarkan nilai C_p , C_t , dan TSR yang lebih tinggi pada rentang kondisi yang diuji. Nilai TSR yang berada pada rentang optimal menunjukkan bahwa turbin Fibonacci memiliki kesesuaian rasio kecepatan putar yang lebih baik terhadap kecepatan aliran fluida. Hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan geometri turbin berpengaruh signifikan terhadap distribusi gaya fluida dan efisiensi konversi energi yang dihasilkan.

Halaman ini sengaja dikosongkan