

**PENGARUH *TANDEM STAGGER CYLINDER* TERHADAP PERFORMA
HIDRODINAMIKA *DRAG* TURBIN**

PROYEK AKHIR



Oleh :

RAFI AKMAL
NIT. 30423008

**PROGRAM STUDI DIPLOMA 3 TEKNIK PESAWAT UDARA
POLITEKNIK PENERBANGAN SURABAYA
2026**

**PENGARUH *TANDEM STAGGER CYLINDER* TERHADAP PERFORMA
HIDRODINAMIKA *DRAG* TURBIN**

PROYEK AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Ahli Madya (A.Md.)
Pada Program Studi Diploma 3 Teknik Pesawat Udara



Oleh :

RAFI AKMAL
NIT. 30423008

**PROGRAM STUDI DIPLOMA 3 TEKNIK PESAWAT UDARA
POLITEKNIK PENERBANGAN SURABAYA
2026**

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH TANDEM STAGGER CYLINDER TERHADAP
PERFORMA HIDRODINAMIKA *DRAG* TURBIN**

Oleh :
Rafi Akmal
NIT. 30423008

Disetujui untuk diujikan pada :
Surabaya, 2026

Pembimbing I : Dr. GUNAWAN SAKTI, S.T., M.T.
NIP. 19881001 200912 1 003



Pembimbing II : Dr. Ir. SETYO HARIYADI S. P., ST, MT
NIP. 19790824 200912 1 001



**PROGRAM STUDI DIPLOMA 3 TEKNIK PESAWAT UDARA
POLITEKNIK PENERBANGAN SURABAYA
2026**

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH TANDEM STAGGER CYLINDER TERHADAP
PERFORMA HIDRODINAMIKA *DRAG* TURBIN**

Oleh :

RAFI AKMAL
NIT. 30423008

Telah dipertahankan dan dinyatakan lulus pada Ujian Tugas Akhir Program
Pendidikan Diploma 3 Teknik Pesawat Udara Politeknik Penerbangan Surabaya pada
tanggal :

Panitia Penguji :

1. Ketua : AJENG WULANSARI, ST, MT
NIP. 19890606 200912 2 001
2. Sekretaris : Dr. BAMBANG BAGUS H.,S.,SiT,MM, MT
NIP. 19810629 200912 1 002
3. Anggota : Dr. GUNAWAN SAKTI, ST., MT.
NIP. 19881001 200912 1 003

Ketua Program Studi
D3 TEKNIK PESAWAT UDARA

NYARIS PAMBUDIYATNO, S.SiT, M.MTr
NIP. 19820525 200502 1001

ABSTRAK

Turbin Savonius memiliki konstruksi sederhana dan kemampuan *self-starting* yang baik, tetapi performanya masih terbatas akibat *drag* negatif pada *returning blade* serta pembentukan *wake* yang menyebabkan kehilangan energi. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh empat *circular cylinder* dalam konfigurasi *tandem-stagger* terhadap performa hidrodinamika turbin Savonius menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* dua dimensi. Simulasi dilakukan menggunakan pendekatan *Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes* dan model turbulensi SST $k-\omega$ dengan fluida kerja air, kecepatan aliran bebas 1 m/s, bilangan Reynolds $3,6 \times 10^5$, serta sudut *stagger* 45° . Variasi *spacing ratio* yang digunakan adalah $S/D = 0,8; 0,9; 1,0$; dan $1,1$. Model numerik diverifikasi melalui uji *grid independence* dan divalidasi dengan membandingkan kecenderungan hasil simulasi terhadap penelitian sebelumnya. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi tekanan, pola aliran, karakteristik *wake*, *coefficient of moment*, dan *coefficient of power*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh variasi *cylinder* mampu meningkatkan performa dibandingkan turbin konvensional. Konfigurasi $S/D = 0,9$ menghasilkan performa terbaik dengan C_m maksimum sebesar 0,515 dan C_p maksimum sebesar 0,373, yang meningkat masing-masing sekitar 41,5% dan 62% dibandingkan turbin konvensional. Konfigurasi tersebut mampu mengarahkan aliran menuju *advancing blade*, mengurangi *drag* negatif pada *returning blade*, serta menghasilkan pola *wake* yang lebih teratur. Dengan demikian, konfigurasi *tandem-stagger cylinder* efektif digunakan sebagai metode *passive flow control* untuk meningkatkan performa hidrodinamika turbin Savonius.

Kata kunci: turbin Savonius, *tandem-stagger cylinder*, hidrodinamika, CFD, *coefficient of moment*, *coefficient of power*.

ABSTRACT

The Savonius turbine has a simple construction and good self-starting capability, but its performance remains limited due to negative drag on the returning blade and wake formation that causes energy losses. This study analyzes the effect of four circular cylinders arranged in a tandem-stagger configuration on the hydrodynamic performance of a Savonius turbine using two-dimensional Computational Fluid Dynamics simulations. The simulations were performed using the Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes approach and the SST $k-\omega$ turbulence model, with water as the working fluid, a free-stream velocity of 1 m/s, a Reynolds number of 3.6×10^5 , and a stagger angle of 45° . The tested spacing ratios were $S/D = 0.8, 0.9, 1.0$, and 1.1 . The numerical model was verified through a grid-independence test and validated against previous studies. The evaluated parameters included pressure distribution, flow patterns, wake characteristics, coefficient of moment, and coefficient of power. The results showed that all cylinder configurations improved turbine performance compared with the conventional design. The $S/D = 0.9$ configuration produced the best performance, with a maximum C_m of 0.515 and a maximum C_p of 0.373, representing improvements of approximately 41.5% and 62%, respectively. Therefore, tandem-stagger cylinders are effective passive flow-control devices for improving the torque and power performance of a hydrokinetic Savonius turbine.

Keywords: Savonius turbine, tandem-stagger cylinder, hydrodynamics, CFD, coefficient of moment, coefficient of power.

PERNYATAAN KEASLIAN DAN HAK CIPTA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rafi Akmal

NIT : 30423008

Program Studi : D3 Teknik Pesawat Udara

Judul Tugas Akhir : *PENGARUH TANDEM STAGGER CYLINDER TERHADAP PERFORMA HIDRODINAMIKA DRAG TURBIN*

dengan ini menyatakan bahwa :

1. Proyek Akhir ini merupakan karya asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik, baik di Politeknik Penerbangan Surabaya maupun di Perguruan Tinggi lain, serta dipublikasikan, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.

2. Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif (Non-Exclusive Royalty-Free Right) kepada Politeknik Penerbangan Surabaya beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak ini, Politeknik Penerbangan Surabaya berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan Proyek Akhir saya dengan tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di Perguruan Tinggi dan Akademi Penerbangan.

Surabaya, 18 Juli 2026

Yang membuat pernyataan



Rafi Akmal

30423008

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Pengaruh Tandem–Stagger Cylinder terhadap Performa Hidrodinamika Turbin Savonius”. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Diploma Tiga pada Program Studi Teknik Pesawat Udara, Politeknik Penerbangan Surabaya.

Penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Ahmad Bahrawi, S.E., M.T., selaku Direktur Politeknik Penerbangan Surabaya.
2. Bapak Nyaris Pambudiyatno, S.SiT., M.MTr., selaku Ketua Program Studi D3 Teknik Pesawat Udara di Politeknik Penerbangan Surabaya
3. Bapak Dr. Gunawan Sakti, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing I, atas bimbingannya dalam materi yang senantiasa membimbing dan membantu dalam penyusunan naskah proyek akhir.
4. Bapak Dr. Ir. Setyo Hariyadi S. P., ST, MT. selaku Dosen Pembimbing II, atas bimbingannya dalam penulisan naskah proyek akhir.
5. Seluruh dosen dan civitas akademika Program Studi Teknik Pesawat Udara Politeknik Penerbangan Surabaya yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat.
6. Kepada Bapak Sigit Wahyudi dan Ibu Sri Mulyani selaku orang tua saya beserta keluarga tercinta yang senantiasa memberikan doa serta bantuan secara materi dan dukungan moral untuk kelancaran proposal proyek akhir ini.
7. Seluruh rekan-rekan D3 Teknik Pesawat Udara angkatan IX yang selalu memberikan bantuan dukungan, dan motivasi selama menempuh Pendidikan di Politeknik Penerbangan Surabaya.
8. Seluruh sahabat, senior, junior, dan segenap pihak yang peneliti tidak dapat menyebutkan satu persatu atas dukungan yang diberikan.

Surabaya, 16 juli 2026

Rafi Akmal
NIT. 30423008

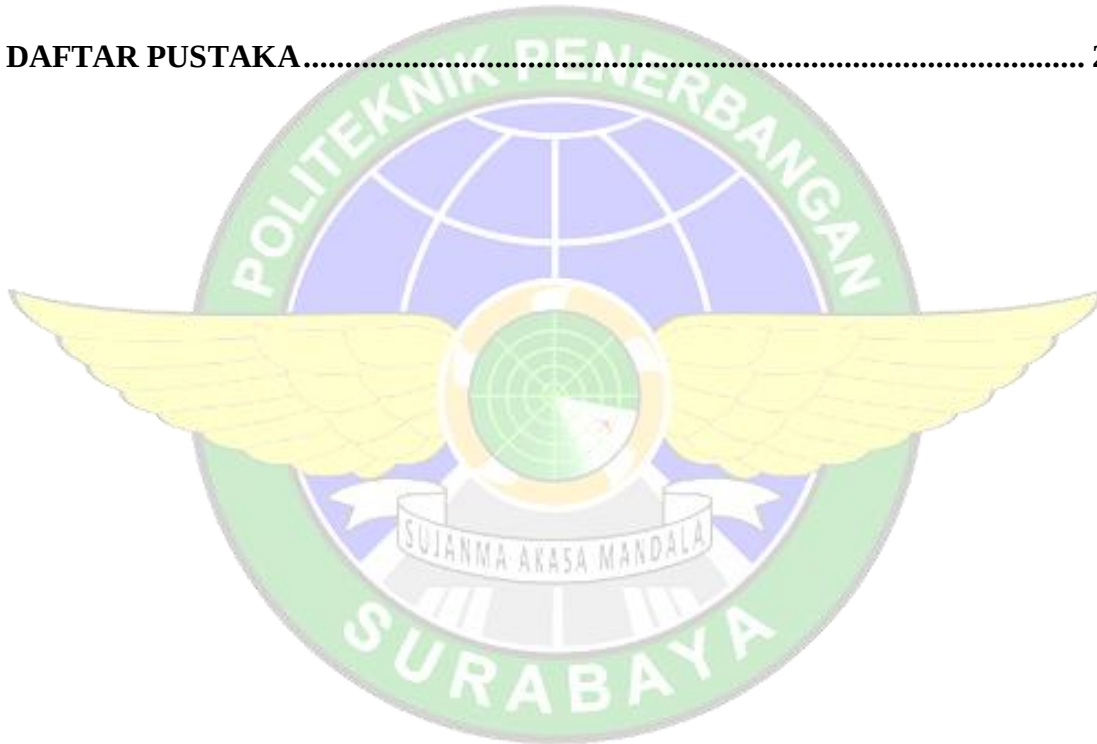
DAFTAR PUSTAKA

ABSTRAK.....	ii
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG.....	1
BAB I PENDAHULUAN.....	Error! Bookmark not defined.
1.1 Latar Belakang	Error! Bookmark not defined.
1.2 Rumusan Masalah	Error! Bookmark not defined.
1.3 Batasan Masalah	Error! Bookmark not defined.
1.4 Tujuan Penelitian	Error! Bookmark not defined.
1.5 Hipotesis	Error! Bookmark not defined.
1.6 Manfaat Penelitian	Error! Bookmark not defined.
BAB II LANDASAN TEORI.....	Error! Bookmark not defined.
2.1 Teori Penunjang	Error! Bookmark not defined.
2.1.1 <i>Drag Type-Turbine</i>	Error! Bookmark not defined.
2.1.2 Hidrodinamika Aliran pada Turbin <i>Drag</i> ..	Error! Bookmark not defined.
2.2 Parameter Performa Hidrodinamika Turbin	Error! Bookmark not defined.
2.2.1 Tip Speed Ratio (TSR)	Error! Bookmark not defined.
2.2.2 Torsi dan Coefficient of Moment (Cm)	Error! Bookmark not defined.
2.3 <i>Drag</i>	Error! Bookmark not defined.

2.3.1 Pressure Drag	Error! Bookmark not defined.
2.3.2 Friction Drag	Error! Bookmark not defined.
2.3.3 Induced Drag.....	Error! Bookmark not defined.
2.3.4 Interference Drag	Error! Bookmark not defined.
2.3.5 Wave Drag	Error! Bookmark not defined.
2.4 Type Of Mesh	Error! Bookmark not defined.
2.4.1 Triangular Mesh	Error! Bookmark not defined.
2.4.2 Quadrilateral Mesh	Error! Bookmark not defined.
2.4.3 Hybrid Mesh	Error! Bookmark not defined.
2.5 VAWT.....	Error! Bookmark not defined.
2.6 Kajian Penelitian Terdahulu	Error! Bookmark not defined.
BAB III METODE PENELITIAN	Error! Bookmark not defined.
3.1 Design Penelitian	Error! Bookmark not defined.
3.1.1 Teknik Pengumpulan Data.....	Error! Bookmark not defined.
3.1.2. Fase Pre-processing	Error! Bookmark not defined.
3.1.3 Perancangan Objek Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
3.2 Geometric Configuration of the Rotor-Cylinder System	Error! Bookmark not defined.
defined.	
3.3 Boundary Conditions.....	Error! Bookmark not defined.
3.4 Mesh Generation and Quality Control	Error! Bookmark not defined.
3.5 Alasan Pemilihan Kriteria $y^+ < 1$ pada Model SST $k-\omega$	Error! Bookmark not defined.
defined.	
3.6 Solver Setup.....	Error! Bookmark not defined.

3.7 Koefisien Performa Hidrodinamika	Error! Bookmark not defined.
3.7.1 <i>Tip Speed Ratio</i>	Error! Bookmark not defined.
3.7.2 Bilangan Reynolds.....	Error! Bookmark not defined.
3.7.3 Coefficient of Moment	Error! Bookmark not defined.
3.7.4 Coefficient of Power (C_p).....	Error! Bookmark not defined.
3.8 Parameter Summary	Error! Bookmark not defined.
3.9 Waktu dan Tempat Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	Error! Bookmark not defined.
4.1 Verifikasi Numerik dan Konvergensi Solusi	Error! Bookmark not defined.
4.1.1 Analisis Grid Independence terhadap C_m .	Error! Bookmark not defined.
4.1.2 Validasi terhadap Literatur	Error! Bookmark not defined.
4.1.3 Konvergensi Simulasi.....	Error! Bookmark not defined.
4.2 Analisis Hidrodinamika Turbin Savonius Tanpa Interference Cylinder ...	Error! Bookmark not defined.
Bookmark not defined.	
4.2.1 Pressure Distribution Characteristics	Error! Bookmark not defined.
4.2.2 Velocity Field Characteristics	Error! Bookmark not defined.
4.2.3 Vorticity and Wake Dynamics	Error! Bookmark not defined.
4.2.4 Streamline Analysis.....	Error! Bookmark not defined.
4.2.5 Nilai C_m dan C_p Baseline.....	Error! Bookmark not defined.
4.3 Pengaruh Variasi Spacing Ratio (S/D).....	Error! Bookmark not defined.
4.3.1 Distribusi Tekanan.....	Error! Bookmark not defined.
4.3.2 Wake Interaction	Error! Bookmark not defined.
4.3.3 Turbulence Intensity	Error! Bookmark not defined.

4.3.4 Pengaruh terhadap C_m	Error! Bookmark not defined.
4.3.5 Pengaruh terhadap C_p	Error! Bookmark not defined.
4.3.6 Spacing Ratio Optimum.....	Error! Bookmark not defined.
4.3.7 Konfigurasi Terbaik Pada S/D 0.9	Error! Bookmark not defined.
BAB V KESIMPULAN	Error! Bookmark not defined.
5.1 Kesimpulan.....	Error! Bookmark not defined.
5.2 Saran.....	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR PUSTAKA	2



DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2. 1 Geometri rotor Savonius dan deflektor bleed-jet. (Eshagh et al., 2020)
..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 2 Distribusi triangular mesh dua dimensi pada domain komputasi turbin Savonius, meliputi rotating zone, stationary zone, detail mesh di sekitar bilah, dan interface sliding mesh. **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 3 Distribusi quadrilateral mesh 2D pada domain komputasi turbin Savonius dengan rotating zone, stationary zone, dan sliding mesh interface.**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 4 Ilustrasi distribusi hybrid mesh 2D pada domain komputasi turbin Savonius dengan kombinasi elemen quadrilateral dan triangular.**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 5 Turbine Water Darieus (Darhmaoui & Sheikh, 2017)**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 6 Turbin Water Savonius (Darhmaoui & Sheikh, 2017)**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 7 Schematic diagram (a) konfigurasi turbin water Savonius dengan penempatan I-65 cylinder dan (b) experimental set-up (Sakti et al., 2019)..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 8 schematic diagram of special duct configuration surrounding Savonius runner: (a) isometric (b) side view (c) top view (Elbatran et al., 2017) **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 9 Hubungan antara Torsi dan RPM. **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 10 Model of 3D computational domain..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2. 11 Computational domain and boundary conditions for staggered floating VAWTs. **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 2 Geometri skematis turbin Savonius dengan konfigurasi silinder melingkar tandem–staggered. Kiri (A): tampilan isometrik 2-D yang menunjukkan rotor yang dikelilingi oleh empat silinder; kanan (B): tampilan atas yang menunjukkan sudut stagger-silinder θ re..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 3 Geometri 2D turbin water savonius S/D 0.8 $\theta = 45^\circ$.**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 4 Geometri 2D turbin water savonius S/D 0.9 $\theta = 45^\circ$.**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 5 Geometri 2D turbin water savonius S/D 1.0 $\theta = 45^\circ$.**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 6 Geometri 2D turbin water savonius S/D 1.1 $\theta = 45^\circ$.**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 7 Domain komputasi dan kondisi batas simulasi CFD 2D turbin Savonius, meliputi velocity inlet, pressure outlet, batas simetri, fixed zone, rotating zone, serta kondisi no-slip wall pada permukaan rotor dan silinder.**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 8 Detail mesh: mesh global di sekitar rotor dan silinder (kiri) dan tampilan terbesar dari mesh yang disempurnakan di zona yang berputar, termasuk lapisan inflasi dekat dinding (kanan). **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 9 Uji ketergantungan grid yang menunjukkan konvergensi koefisien momen C_m seiring dengan peningkatan resolusi mesh dari Mesh A hingga Mesh G (jumlah sel dari 454k hingga 840k). **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3. 10 Various layers near wall region with U^+ dan Y^+ -curve..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 1 Distribusi coefficient of moment (C_m) hasil uji independensi grid pada berbagai resolusi mesh: (a) pembesaran kurva pada $\theta = 0^\circ$ – 40° dan (b) distribusi C_m sepanjang satu siklus rotasi rotor (0° – 360°). Mesh D dipilih sebagai grid penelitian karena telah..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 2 Perbandingan coefficient of power (C_p) hasil simulasi penelitian ini dengan Kumar dan Saini (2020) pada variasi tip speed ratio (TSR). **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 3 Grafik C_m vs. Azimuth Angle θ turbin konvensional, $Re=3.6 \times 10^5$, $\lambda=0.7$, pada putaran ke-5 pada time step 1440-1800. **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 4 Plot kontur tekanan dan kontur kecepatan dengan streamlines pada azimuth angle $\theta = 0^\circ$ untuk turbin konvensional, $Re=3.6 \times 10^5$, $\lambda = 0.7$, pada putaran ke-5 pada time step 1440-1800. **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 5 Distribusi magnitude vorticity pada turbin Savonius konvensional pada sudut azimuth $Re=3.6 \times 10^5$, dan $\lambda = 0.7$ **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 6 Perbandingan coefficient of moment (C_m) terhadap tip-speed ratio (TSR) antara data eksperimen Kumar dan Saini (2020) dan hasil penelitian pada kondisi $V = 1$ m/s water. **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 7 Perbandingan coefficient of power (C_p) terhadap tip-speed ratio (TSR) antara data eksperimen Kumar dan Saini (2020) dan hasil simulasi numerik turbin Savonius konvensional pada media water 1 m/s. **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 8 Plot kontur tekanan dan kontur kecepatan dengan streamlines pada azimuth angle $\theta = 0^\circ$ untuk turbin konvensional, turbin Tandem-stagger S/D 1.1, dan turbin Tandem stagger S/D 0.8, $Re = Re=3.6 \times 10^5$, pada putaran ke-5 pada time step 1440-1800. **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 9 Plot kontur tekanan dan kontur kecepatan dengan streamlines pada azimuth angle $\theta = 130^\circ$ untuk turbin konvensional, turbin Tandem-stagger S/D 1.1, dan turbin Tandem stagger S/D 0.9, $Re=3.6 \times 10^5$, pada putaran ke-5 pada time step 1440-1800. **Error! Bookmark not defined.**

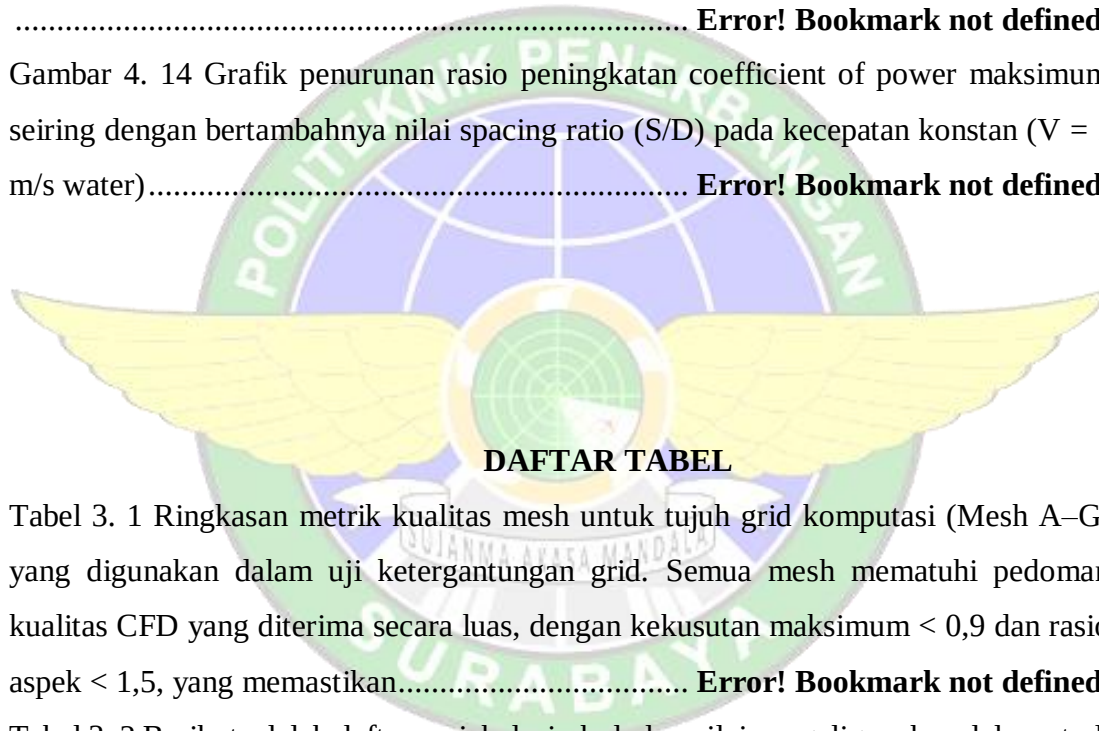
Gambar 4. 10 Distribusi Vorticity magnitude pada turbin konvensional, turbin Tandem-stagger S/D 1.1, dan turbin Tandem-stagger S/D 0.9. Pada sudut azimuth $\theta = 0^\circ$ $Re=3.6 \times 10^5$. **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 11 Distribusi magnitude vorticity pada turbin konvensional, turbin Tandem-stagger S/D 1.1, dan turbin Tandem-stagger S/D 0.8. Pada sudut azimuth $\theta = 130^\circ$ $Re=3.6 \times 10^5$ **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 12 Pengaruh tips speed ratio (λ) terhadap coefficient of moment pada desain turbin konvensional dan modifikasi dengan berbagai variasi rasio jarak (S/D).. **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 13 Pengaruh tips speed ratio (λ) terhadap coefficient of Power pada desain turbin konvensional dan modifikasi dengan berbagai variasi rasio jarak celah (S/D). **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 14 Grafik penurunan rasio peningkatan coefficient of power maksimum seiring dengan bertambahnya nilai spacing ratio (S/D) pada kecepatan konstan ($V = 1$ m/s water)..... **Error! Bookmark not defined.**



DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Ringkasan metrik kualitas mesh untuk tujuh grid komputasi (Mesh A–G) yang digunakan dalam uji ketergantungan grid. Semua mesh mematuhi pedoman kualitas CFD yang diterima secara luas, dengan kekusutan maksimum $< 0,9$ dan rasio aspek $< 1,5$, yang memastikan..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3. 2 Berikut adalah daftar variabel, simbol, dan nilai yang digunakan dalam studi parameter terkait geometri rotor, properti fluida, kecepatan aliran, rasio kecepatan ujung (TSR), dan konfigurasi silinder. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3. 3 Rincian Waktu Penelitian **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 1 Perbandingan nilai coefficient of power (C_p) hasil penelitian ini dengan data CFD dan eksperimen Kumar & Saini (2020) pada variasi tip speed ratio (TSR). **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 2 Validasi hasil simulasi numerik penelitian ini dengan hasil eksperimental turbin konvensional pada $Re=3.6 \times 10^5$, dan $\lambda = 0.7$. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 3 Perbandingan nilai coefficient of moment (C_m) antara desain konvensional dengan variasi rasio **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 4 Perbandingan nilai coefficient of power (C_p) antara desain turbin konvensional dan modifikasi variasi rasio jarak celah (S/D) pada berbagai tingkat tips speed ratio (λ). **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 5 Nilai rasio peningkatan performa C_{pmax}/C_{p0max} pada berbagai variasi spacing ratio (S/D) dengan kondisi bilangan Reynolds konstan $Re= 3.6 \times 10^5$ **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4. 6 Perbandingan nilai maksimum dan persentase peningkatan $\Delta\%$ untuk coefficient of moment dan coefficient of power antara desain turbin konvensional dengan variasi rasio (S/D) pada bilangan Reynolds konstan $Re = 3,6 \times 10^5$ **Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

Singkatan/Lambang	Keterangan	Satuan/Dimensi
CFD	Computational Fluid Dynamics	-
URANS	Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes	-
SST k- ω	Shear Stress Transport k-omega	-
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine / Vertical Axis Turbine	-
TSR / λ	Tip Speed Ratio	-

Re	Bilangan Reynolds	-
U	Kecepatan aliran bebas	m/s
S/D	Rasio jarak antar silinder terhadap diameter silinder	-
θ	Sudut azimuth atau sudut stagger sesuai konteks	derajat ($^{\circ}$)
Cm	Coefficient of Moment / koefisien momen	-
Cp	Coefficient of Power / koefisien daya	-
y+	Parameter nondimensional mesh dekat dinding	-
D	Diameter rotor atau diameter referensi	mm
d	Diameter circular cylinder	mm
Wake	Daerah aliran terganggu di belakang rotor/silinder	-
Vorticity	Besaran rotasi lokal fluida	s^{-1}

DAFTAR PUSTAKA

- Akwa, J. V., Alves da Silva Júnior, G., & Petry, A. P. (2012). Discussion on the Verification of the Overlap Ratio Influence on Performance Coefficients of a Savonius Wind Rotor Using Computational Fluid Dynamics. *Renewable Energy*, 38(1), 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.013>
- Al-Gburi, K. A. H., Alnaimi, F. B. I., Al-quraishi, B. A. J., Tan, E. S., & Kareem, A. K. (2023). Enhancing Savonius Vertical Axis Wind Turbine Performance: A Comprehensive Approach with Numerical Analysis and Experimental Investigations. *Energies*, 16(10), 4204. <https://doi.org/10.3390/en16104204>
- Anderson, J. D. (2011). *Fundamentals of aerodynamics*. (5th ed.). McGraw-Hill. <https://doi.org/10.2514/152157>
- Blazek, J. (2015). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Buick, S., & M., i and J. (2023). *fluids*. 1–21.
- Chen, W.-L., Wen, C.-Y., Li, H., Wang, Z., Liu, H., & Zhou, T. (2022). Review of Active Control of Circular Cylinder Flow. *Ocean Engineering*, 258, 111840. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111840>
- Darhmaoui, H., & Sheikh, N. (2017). *University Honors Program SAVONIUS VERTICAL WIND TURBINE: DESIGN, SIMULATION, AND PHYSICAL TESTING* Eddahmani Aymane. (May).
- Elbatran, A. H., Ahmed, Y. M., & Shehata, A. S. (2017). Performance study of ducted nozzle Savonius water turbine, comparison with conventional Savonius turbine. *Energy*, 134, 566–584. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.041>
- Eshagh Nimvari, M., Fatahian, H., & Fatahian, E. (2020). Performance Improvement of a Savonius Vertical Axis Wind Turbine Using a Porous Deflector. *Energy Conversion and Management*, 220, 113062. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113062>
- Ghafoorian, F., Mirmotahari, S. R., Mehrpooya, M., Ghafoorian, F., & Azadani, L. N. (2024). Aerodynamic Performance and Efficiency Enhancement of a Savonius

- Vertical Axis Wind Turbine with Semi-Directional Curved Guide Vane, Using CFD and Optimization Method. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46, 443. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05030-6>
- Kamoji, M. A., Kedare, S. B., & Prabhu, S. V. (2009). Performance Tests on Helical Savonius Rotors. *Renewable Energy*, 34(3), 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.002>
- Kumar, A., & Saini, G. (2020). Flow field and performance study of Savonius water turbine. *Materials Today: Proceedings*, 46(xxxx), 5219–5222. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.591>
- Li, T., & Ishihara, T. (2021a). Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics Numerical study on wake galloping of tandem circular cylinders considering the effects of mass and spacing ratios. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 210(February), 104536. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104536>
- Li, T., & Ishihara, T. (2021b). Numerical Study on Wake Galloping of Tandem Circular Cylinders Considering the Effects of Mass and Spacing Ratios. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 210, 104536. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104536>
- Manceau, R. (2023). *Turbulence modelling for CFD Remi Manceau To cite this version : HAL Id : hal-03207433 Turbulence modelling for CFD.*
- Mrigua, K., Mnaouar, H., & Driss, Z. (2022). Numerical Investigation of a New Modified Savonius Wind Turbines. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(3), 708–715. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.45799>
- Nobile, R., Vahdati, M., Barlow, J. F., & Mewburn-Crook, A. (2014). Unsteady Flow Simulation of a Vertical Axis Augmented Wind Turbine: A Two-Dimensional Study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 125, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.12.005>
- Qasemi, K., & Azadani, L. N. (2020). Optimization of the Power Output of a Vertical Axis Wind Turbine Augmented with a Flat Plate Deflector. *Energy*, 202, 117745.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117745>

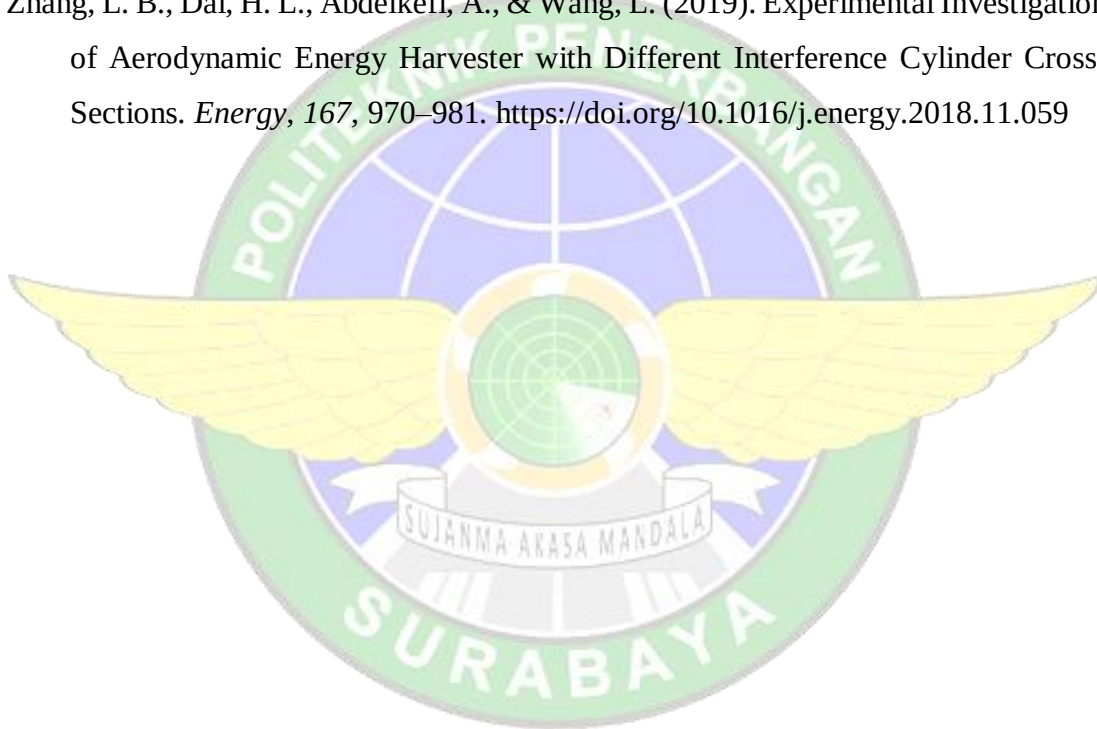
- Ramarajan, J., & Jayavel, S. (2022). Performance Improvement in Savonius Wind Turbine by Modification of Blade Shape. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 15(1), 99–107. <https://doi.org/10.47176/jafm.15.01.32516>
- Rauf. (2020). *Analisis Pengaruh Kontrol Aktif Separasi Aliran Pada Model Kendaraan Terhadap Hambatan Hidrodinamika*.
- Sakti, G., & Yuwono, T. (2019). *Performance Study of Installed an I-65 o Type Cylinder at the Upstream of Returning Blade of Savonius Wind Turbine , Comparison with Conventional Savonius Wind Turbine*. 30(2), 56–59.
- Senarathna, W., Fernando, M., Silva, T., & Abeykoon, C. (2022). The Design of a Savonius Wind Turbine with Guide Vanes: A Computational Approach. *Proceedings of the 7th World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT 2022)*. <https://doi.org/10.11159/ehst22.133>
- Setiawan, P. A., Soim, S., Antoko, B., Lukitadi, P. P. S., Santoso, E., Ariwiyono, N., Antarikasih, D. D. K. R., & Disrinama, A. (2024). Performance Investigation of the Savonius Wind Turbine by Putting a Rotating Cylinder in the Front of Advancing by Varying the Diameter and Stagger Angle. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 9(3). <https://doi.org/10.12962/j25481479.v9i3.21136>
- Thiyagaraj, J., Rahamathullah, I., Anbuezhhiyan, G., Barathiraja, R., & Ponshanmugakumar, A. (2021). Influence of Blade Numbers, Overlap Ratio and Modified Blades on Performance Characteristics of the Savonius Hydro-Kinetic Turbine. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7711–7718. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.568>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2nd ed.). Pearson Education.
- Wong, K. H., Chong, W. T., Sukiman, N. L., Poh, S. C., Shiah, Y. C., & Wang, C. T. (2017). Performance Enhancements on Vertical Axis Wind Turbines Using Flow Augmentation Systems: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,

73, 904–921. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.160>

Yahya, W., Ziming, K., Juan, W., Saqlain, M., Al-Nehari, M., Salim, E., & Danardono, D. (2021). Influence of Tilt Angle and the Number of Guide Vane Blades towards the Savonius Rotor Performance. *Energy Reports*, 7, 3317–3327. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.053>

Yudistira, R., Nindito, D. A., & Sari, R. H. S. (2021). Uji Eksperimental Pengembangan Turbin Hidrokinetik Savonius Berdasarkan Bentuk Profil Distribusi Kecepatan Aliran. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 7(1), 1–10.

Zhang, L. B., Dai, H. L., Abdelkefi, A., & Wang, L. (2019). Experimental Investigation of Aerodynamic Energy Harvester with Different Interference Cylinder Cross-Sections. *Energy*, 167, 970–981. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.059>





Rafi Akmal lahir di Jakarta, 20 April 2004. Penulis ini merupakan anak ke 3 dari 3 bersaudara, dari pasangan Bapak Sigit Wahyudi dan Ibu Sri mulyani, kini menetap di Jl. Kebantenan IV RT005/004 No.11 Kel. Semper Timur Kec. Cilincing Jakarta Utara. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu Sekolah dasar yaitu SDN 08 Cilincing tamat tahun 2016, SMPN 244 Jakarta tamat Tahun 2019, SMK 1 Perguruan Cikini Jakarta tamat pada tahun 2022, kemudian pada tahun 2023 mengikuti program diploma 3 di poltekbang Surabaya sampai dengan penelitian tugas akhir ini masih terdaftar sebagai taruna politeknik penerbangan Surabaya Selama menempuh pendidikan, penulis memperoleh berbagai pengalaman akademik dan praktik yang mendukung pengembangan kemampuan serta kompetensi di bidang penerbangan. Hingga penyusunan tugas akhir ini, penulis masih tercatat sebagai taruna aktif Politeknik Penerbangan Surabaya. Melalui pendidikan dan pengalaman yang diperoleh selama masa perkuliahan, penulis berharap dapat terus mengembangkan kemampuan serta memberikan kontribusi positif dalam bidang yang ditekuni.