

SKRIPSI

**INVESTIGASI PENGARUH KETEBALAN SUDU
CEMBUNG *TRAILING EDGE* TURBIN *CROSSFLOW*
SKALA PIKO MENGGUNAKAN METODE CFD**



Oleh:

ZAHWA ALYA RYANANDA PUTRI

03051382126119

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2025

SKRIPSI

**INVESTIGASI PENGARUH KETEBALAN SUDU
CEMBUNG *TRAILING EDGE* TURBIN *CROSSFLOW*
SKALA PIKO MENGGUNAKAN METODE CFD**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana
Teknik Mesin Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya**



OLEH

ZAHWA ALYA RYANANDA PUTRI

03051382126119

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2025

HALAMAN PENGESAHAN

INVESTIGASI PENGARUH KETEBALAN SUDU CEMBUNG *TRAILING EDGE* TURBIN *CROSSFLOW* SKALA PIKO MENGUNAKAN METODE CFD

SKRIPSI

Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin
Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Oleh:

ZAHWA ALYA RYANANDA PUTRI
03051382126119

Palembang, Juli 2025

Diperiksa dan disetujui oleh
Pembimbing Skripsi

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Prof. Ir. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197909272003121004



Dr. Ir. Dendy Adanta, S.Pd., M.T.
NIP. 199306052019031016

JURUSAN TEKNIK MESIN

Agenda No.

: 022/TM/AK/2025

FAKULTAS TEKNIK

Diterima Tanggal

: 21 Agustus 2025

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Paraf

: 

SKRIPSI

NAMA : ZAHWA ALYA RYANANDA PUTRI
NIM : 03051382126119
JURUSAN : TEKNIK MESIN
JUDUL SKRIPSI : INVESTIGASI PENGARUH KETEBALAN
SUDU CEMBUNG *TRAILING EDGE* TURBIN
CROSSFLOW SKALA PIKO MENGGUNAKAN
METODE CFD
DIBUAT TANGGAL : 30 DESEMBER 2024
SELESAI TANGGAL : 16 JULI 2025

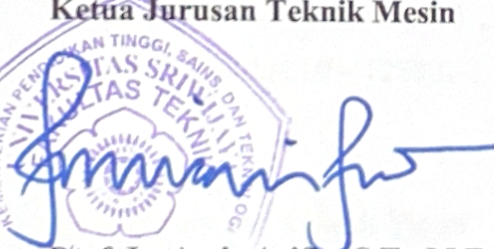
Palembang, 16 Juli 2025

Mengetahui,

Diperiksa dan disetujui oleh:

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Pembimbing Skripsi


Prof. Ir. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197909272003121004


Dr. Ir. Dedy Adanta, S.Pd., M.T.
NIP. 199306052019031016

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Skripsi ini dengan judul “Investigasi Pengaruh Ketebalan Sudu Cembung *Trailing Edge* Turbin *Crossflow* Skala Piko Menggunakan Metode CFD” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin Universitas Sriwijaya pada tanggal 16 Juli 2025.

Palembang, 16 Juli 2025

Tim Penguji Karya tulis ilmiah berupa Skripsi:

Ketua :

1. Dr. Fajri Vidian, S.T., M.T.
NIP. 197207162006041002

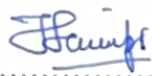

(.....)

Anggota :

2. Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri
NIP. 195802011984031002


(.....)

3. Dr. Ir. Dewi Puspitasari, S.T., M.T.
NIP. 197001151994122001


(.....)

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Prof. Ir. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197909272003121004

Pembimbing Skripsi


Dr. Ir. Dendy Adanta, S.Pd., M.T.
NIP. 199306052019031016

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas rahmat Allah SWT, atas berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan baik yang berjudul “Investigasi Pengaruh Ketebalan Sudu Cembung *Trailing Edge* Turbin *Crossflow* Skala Piko Menggunakan Metode CFD”

Penulis dapat menyelesaikan skripsi ini tentunya dengan mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak-pihak. Oleh Karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Fredi Atmaja dan Ibu Zurmitita Aprianti selaku orang tua penulis yang telah memberikan do’a dan dukungan.
2. Edo Apriadi Ramadhan dan Yessi Saga selaku saudara penulis yang telah memotivasi dalam penyusunan tugas akhir.
3. Bapak Dr. Ir. Dendy Adanta, S.Pd., M.T selaku dosen pembimbing yang telah membimbing, mendukung, dan memberikan saran selama penyusunan tugas akhir.
4. Bapak Prof. Ir. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D. dan Bapak Ir. Barlin, S.T., M.Eng., Ph.D selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya.
5. Seluruh dosen, jajaran staf dan karyawan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
6. Rekan *hydropower research group* yang telah memberikan saran dan bantuan dalam proses penelitian.
7. Teman seperjuangan KD *garage* yang telah memberikan bantuan dan motivasi selama kepenulisan.
8. Teman – teman HMM FT UNSRI yang telah menjadi bagian dalam perjalanan kuliah.
9. Teman - teman angkatan 2021 atas kebersamaan yang telah dibina dari awal perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa dalam proses penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan karena terbatasnya pengetahuan. Oleh karena itu, kritik serta saran

yang membangun dalam pelaksanaan skripsi ini akan sangat membantu dalam perbaikan kedepannya. Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih dan semoga karya tulis ilmiah ini dapat bermanfaat sebagai referensi pembelajaran khususnya pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

Palembang, 16 Juli 2025



Zahwa Alya Ryananda Putri
NIM 03051382126119

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Zahwa Alya Ryananda Putri

NIM : 03051382126119

Judul : Investigasi Pengaruh Ketebalan Sudu Cembung *Trailing Edge* Turbin
Crossflow Skala Piko Menggunakan Metode CFD

Memberikan izin kepada Pembimbing dan Universitas Sriwijaya untuk mempublikasikan hasil penelitian saya untuk kepentingan akademik apabila dalam waktu 1 (satu) tahun tidak mempublikasikan karya penelitian saya. Dalam kasus ini saya setuju untuk menempatkan Pembimbing sebagai penulis korespondensi (*corresponding author*).

Demikian pernyataan saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari pihak manapun.

Palembang, 16 Juli 2025



Zahwa Alya Ryananda Putri
NIM. 03051382126119

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Zahwa Alya Ryananda Putri

NIM : 03051382126119

Judul : Investigasi Pengaruh Ketebalan Sudu Cembung *Trailing Edge* Turbin
Crossflow Skala Piko Menggunakan Metode CFD

Menyatakan bahwa skripsi saya merupakan hasil karya saya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai dengan aturan yang berlaku.

Demikian pernyataan saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari pihak manapun.



Palembang, 16 Juli 2025



Zahwa Alya Ryananda Putri
NIM. 03051382126119

RINGKASAN

INVESTIGASI PENGARUH KETEBALAN SUDU CEMBUNG *TRAILING EDGE* TURBIN *CROSSFLOW* SKALA PIKO MENGGUNAKAN METODE CFD

Karya tulis ilmiah berupa skripsi, 16 Juli 2025

Zahwa Alya Ryananda Putri, dibimbing oleh Dr. Ir. Dendy Adanta, S.Pd, M.T, xxix + 110 Halaman, 21 Tabel, 43 Gambar, 12 Lampiran

Tantangan terbesar yang sering dialami saat ini oleh seluruh negara termasuk Indonesia adalah krisis energi. Karena semua aktivitas manusia membutuhkan energi, seperti produksi industri, transportasi, dan kegiatan rumah tangga. Tahun 2022 Indonesia memiliki rasio elektrifikasi nasional sebesar 99,63%, banyak wilayah terpencil yang masih kekurangan listrik. Alternatif tepat dalam meningkatkan rasio elektrifikasi daerah terpencil adalah menggunakan pembangkit listrik *off-grid* yaitu turbin air skala piko (< 5 kW). Jenis turbin yang dapat menjadi solusi praktis untuk menyediakan listrik ke daerah terpencil adalah Turbin *crossflow* skala piko karena memiliki biaya produksi dan operasional yang relatif lebih rendah dan konstruksinya yang sederhana serta dapat beroperasi pada kondisi *head* rendah. Meskipun telah lama ditemukan dan dikembangkan, kajian tentang konfigurasi *upper* sudu belum mendapatkan perhatian khusus.

Dari literatur sebelumnya, *upper* sudu cembung *trailing* merupakan salah satu yang menjanjikan dalam meningkatkan efisiensi turbin *crossflow*. Dengan demikian, studi ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh ketebalan sudu cembung *trailing edge* turbin *crossflow* skala piko menggunakan metode *computational fluid dynamics* (CFD). Dalam studi ini digunakan metode analitik untuk merancang turbin dan CFD untuk memprediksi serta mempelajari fenomena

aliran fluida, kemudian hasil studi dibandingkan dengan studi-studi sebelumnya untuk verifikasi hasil.

Efisiensi yang dihasilkan sebesar 75,84% dengan daya mekanik sebesar 293,72 W. T/L 1,5 pada putaran 600 rpm menghasilkan efisiensi maksimum sebesar 70,54% dengan daya mekanik sebesar 270,49 W dan T/L 0,5 menghasilkan efisiensi terendah sebesar 46,29% dengan daya mekanik sebesar 191,87 W pada putaran 700 rpm. Kemudian, dari hasil menunjukkan bahwa *head* air tidak ada pengaruh terhadap efisiensi turbin *crossflow* meskipun rasio ketebalan sudu divariasikan. Hal ini dibuktikan melalui analisis ANOVA yang menghasilkan nilai *p-value* sebesar 0,555044 yang lebih tinggi dari nilai signifikansi 0,05. Lebih lanjut, visualisasi tekanan mengindikasikan adanya perbedaan tekanan antara bagian atas dan bawah sudu, yang mengindikasikan terciptanya gaya angkat, dan visualisasi kecepatan aliran menunjukkan bahwa separasi aliran paling sediki terjadi pada profil sudu dengan rasio T/L 1,0 yang menyerupai bentuk *airfoil* terbalik (*backward configuration*).

Kata kunci : turbin crossflow *trailing edge*, sudu turbin, CFD

Kepustakaan : 38

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECT CONVEX BLADE THICKNESS ON PICO-SCALE TRAILING EDGE CROSSFLOW TURBINE USING CFD METHOD

Scientific Writing in the form of an Undergraduate Thesis, July 16th 2025

Zahwa Alya Ryananda Putri, Supervised by Dr. Ir. Dendy Adanta, S.Pd, M.T,
xxiix + 110 Pages, 21 Tabels, 43 Figures, 12 Apendices

The biggest challenge currently faced by all countries, including Indonesia is the energy crisis. This is because all human activities require energy, such as industrial production, transportation, and household activities. In 2022 Indonesia has a national electrification ratio of 99.63%, many remote areas still lack electricity. The right alternative to increasing the electrification ratio of remote areas is to use off-grid power plants, namely pico-scale water turbines (<5 kW). The type of turbine that can be a practical solution for providing electricity to remote areas is the pico-scale crossflow turbine because it has relatively low production and operational costs, simple construction and can operate at low head conditions. Although it has long been discovered and developed, studies of the configuration upper blade has not received specific attention.

From previous literature, convex trailing edge is one of the promising ones in improving the efficiency of crossflow turbines. Thus, this study aims to investigate the effect of convex trailing edge blade thickness on pico-scale crossflow turbine using computational fluid dynamics (CFD) method. In this study, analytical methods are used to design the turbine and CFD to predict and study the fluid flow phenomena, and the results are compared with previous studies for verification of the results.

From the simulation results of trailing edge convex blades, it is found that the thickness ratio of 1.0 at 700 rpm perfoms better compared to other T/L variations. The resulting efficiency is 75.84% with a mechanical power of 293.72 W. T/L 1.5

at 600 rpm produces a maximum efficiency of 70.54% with a mechanical power of 270.49 W and T/L 0.5 produces the lowest efficiency of 46.29% with a mechanical power of 191.87 W at 700 rpm. Then, the results show that the water head has no effect on the efficiency of the crossflow turbine even though the blade thickness ratio is varied. This was proven through ANOVA analysis which resulted in a p-value of 0.555044 which is higher than the significance value of 0.05. Furthermore, the pressure visualization indicates a pressure difference between the top and bottom of the blade, which indicates the creation of lift, and the flow velocity visualization shows that the least flow separation occurs in the blade profile with an T/L ratio of 1.0 which resembles the shape of a backward configuration airfoil.

Keywords : crossflow turbine trailing edge, blade turbine, CFD

Literature : 38

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Definisi	Satuan
B	Lebar nozel	mm
c	Kecepatan absolut	m/s
Cn	Courant number	-
D ₁	Diameter luar <i>runner</i>	mm
D ₂	Diameter dalam <i>runner</i>	mm
g	Gravitasi bumi	m/s ²
H	Jumlah elemen mesh	-
H _t	Head turbin	m
k	Koefisien kecepatan masuk/jet	-
<i>k</i>	Energi kinetik turbulensi	m ² /s ²
L	Lebar sudu	mm
m	massa	kg
n	Putaran runer	rpm
P _{potensial}	Daya potensial air	Watt
P _{mech}	Daya mekanis	Watt
P _n	Koefisien konvergen	-
P	Tekanan	Pa
Q	Debit aliran	m ³ /s
R _b	Radius sudu	mm
r _{sudu}	Jari-jari sudu	mm
S ₀	Tinggi nozel	mm
s	Jarak antar sudu	-
T	Torsi	Nm
t	Waktu	s
<i>u</i>	Kecepatan tangensial	m/s
W	Lebar turbin	mm
<i>w</i>	Kecepatan relatif	m/s
z	Jumlah sudu	-

α	Sudut antara arah aliran fluida	Derajat
β	Sudut sudu	Derajat
ε	Tingkat disipasi	m^2/s^3
ρ	Densitas	Kg/m^3
$\rho u'_i u_j$	Tensor tegangan reynold	$\text{N}\cdot\text{m}$
σ_{ij}	Tensor tegangan viskos	$\text{N}\cdot\text{m N}\cdot\text{m}$
δ	Kelengkungan sudut sudu	Derajat
μ_t	Eddy Viskositas	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
λ	Sudut pelepasan masuk	Derajat
η	Efisiensi	%
ω	Kecepatan putar	Rad/s
μ	Viskositas dnamis	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\Delta \mathbf{x}$	Jarak	m
1,3	Tahap masuk pertama dan kedua	-
2,4	Tahap keluar pertama dan kedua	-
$\mathbf{x}, \mathbf{r}$	Arah tangensial dan radial	-
$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$	Vektor kartesian	-

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	v
SKRIPSI.....	vii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ix
KATA PENGANTAR	xi
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	xiii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS.....	xv
RINGKASAN	xvii
SUMMARY	xix
DAFTAR SIMBOL.....	xxi
DAFTAR ISI.....	xxiii
DAFTAR GAMBAR	xxvii
DAFTAR TABEL	xxix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Studi Literatur.....	5
2.2 Turbin Air	7
2.2.1 Definisi Turbin Air	7
2.2.2 Klasifikasi Berdasarkan Prinsip Kerja.....	7

2.3	Energi Air.....	8
2.4	Analisis Segitiga Kecepatan	9
2.4.1	Tahap Pertama	10
2.4.1.1	Inlet	10
2.4.1.2	Outlet.....	12
2.4.2	Tahap Kedua	13
2.4.2.1	Inlet	13
2.4.2.2	Outlet.....	14
2.5	Analisis Perubahan Momentum.....	15
2.6	Geometri Runner.....	16
2.7	Geometri Nozzle	18
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		21
3.1	Metode Analitik	21
3.2	Metode Simulasi	23
3.2.1	Persamaan Garis Sudu	23
3.2.2	Geometri Turbin Crossflow	26
3.2.3	Kondisi Batas.....	29
3.2.4	Mesh.....	32
3.2.5	Set-up CFD	32
3.3	Analisis Uji Independensi.....	34
3.4	Target Penelitian	35
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		37
4.1	Hasil	37
4.1.1	Hasil Analitik.....	37
4.1.2	Hasil Simulasi	40
4.1.2.1	Mesh Independency Test (GCI).....	40
4.1.2.2	<i>Timestep Independency Test</i>	41

4.1.2.3	Hubungan putaran <i>runner</i> terhadap torsi.....	42
4.1.2.4	Hubungan putaran <i>runner</i> terhadap daya mekanis.....	45
4.1.2.5	Hubungan putaran <i>runner</i> terhadap debit.....	49
4.1.2.6	Hubungan putaran <i>runner</i> terhadap efisiensi	52
4.2	Diskusi.....	56
4.2.1	Visualisasi Hasil Simulasi	58
4.2.1.1	Visualisasi Kontur Tekanan	58
4.2.1.2	Visualisasi Kecepatan Aliran	61
4.2.1.3	Visualisasi Kontur Aliran.....	65
4.2.2	Perbandingan Hasil Efisiensi dengan Studi Sebelumnya.....	66
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....		67
5.1	Kesimpulan.....	67
5.2	Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA		69
LAMPIRAN.....		73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Skematik Segitiga Kecepatan.....	9
Gambar 2. 2	Kecepatan Absolut Air Masuk Nozel.....	10
Gambar 2. 3	Kecepatan Keliling U_1	11
Gambar 2. 4	Kecepatan Air Keluar Sudu Tahap Pertama	12
Gambar 2. 5	Kecepatan Air Masuk Sudu Tahap Kedua	13
Gambar 2. 6	Kecepatan Air Keluar Sudu Tahap Kedua	14
Gambar 2. 7	Skematik Sisi pada Sudu.....	17
Gambar 2. 8	Skematik Sudut pada Sudu.....	17
Gambar 2. 9	Skematik Sisi dan Sudut Nozel	19
Gambar 3. 1	Diagram Alir Perancangan Turbin <i>Crossflow</i>	22
Gambar 3. 2	Diagram Alir Simulasi Turbin <i>Crossflow</i>	23
Gambar 3. 3	Persamaan Garis Rasio 0.5.....	24
Gambar 3. 4	Persamaan Garis Rasio 1	25
Gambar 3. 5	Persamaan Garis Rasio 1.5.....	25
Gambar 3. 6	Rasio 0,5.....	26
Gambar 3. 7	Rasio 1.....	26
Gambar 3. 8	Rasio 1,5.....	27
Gambar 3. 9	Runner Turbin <i>Crossflow</i>	28
Gambar 3. 10	Tampak Samping Turbin <i>Crossflow</i>	28
Gambar 3. 11	Turbin <i>Crossflow</i> Hasil Perancangan.....	29
Gambar 3. 12	Skematik Kondisi Batas Geometri	31
Gambar 4. 1	Distribusi Mesh	41
Gambar 4. 2	Hubungan antara torsi terhadap putaran <i>runner</i> pada <i>head</i> 3m	43
Gambar 4. 3	Hubungan antara torsi terhadap putaran <i>runner</i> pada <i>head</i> 4m	44
Gambar 4. 4	Hubungan antara torsi terhadap putaran <i>runner</i> pada <i>head</i> 5m	45
Gambar 4. 5	Hubungan antara daya mekanis terhadap putaran runner pada head 3m.....	47
Gambar 4. 6	Hubungan antara daya mekanis terhadap putaran runner pada head 4m.....	48

Gambar 4. 7 Hubungan antara daya mekanis terhadap putaran runner pada head 5m.....	49
Gambar 4. 8 Hubungan antara debit terhadap putaran <i>runner</i> pada <i>head</i> 3m.....	50
Gambar 4. 9 Hubungan antara debit terhadap putaran <i>runner</i> pada <i>head</i> 4m.....	51
Gambar 4. 10 Hubungan antara debit terhadap putaran <i>runner</i> pada <i>head</i> 5m.....	52
Gambar 4. 11 Hubungan antara efisiensi terhadap putaran <i>runner</i> pada <i>head</i> 3m	54
Gambar 4. 12 Hubungan antara efisiensi terhadap putaran <i>runner</i> pada <i>head</i> 4m	55
Gambar 4. 13 Hubungan antara efisiensi terhadap putaran <i>runner</i> pada <i>head</i> 5m	56
Gambar 4. 14 Visualisasi kontur tekanan rasio 0,5 pada kondisi <i>head</i> 3m.....	58
Gambar 4. 15 Visualisasi Tekanan pada kondisi head 3m (a) rasio 0,5 ; (b) rasio 1,0 ; (c) rasio 1,5.....	60
Gambar 4. 16 Visualisasi Kecepatan ;.....	61
Gambar 4. 17 Aliran air pada rasio 0,5.....	62
Gambar 4. 18 Aliran air pada rasio 1,0.....	62
Gambar 4. 19 Aliran air pada rasio 1,5.....	63
Gambar 4. 20 Kecepatan aliran pada head 3m (a) Rasio 0,5 ; Rasio 1,0 ; Rasio 1,5.....	64
Gambar 4. 21 Visualisasi Kontur Aliran pada head 3m (a) rasio 0,5 ; (b) rasio 1,0 ; (c) rasio 1,5.....	65
Gambar 4. 22 Perbandingan Hasil Efisiensi.....	66

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Data Geometri dan Efisiensi	6
Tabel 3. 1 Geometri Turbin <i>Crossflow</i> Hasil Perancangan.....	27
Tabel 3. 2 Parameter <i>Boundary Condition</i> Simulasi Turbin <i>Crossflow</i>	31
Tabel 3. 3 Jadwal Penelitian.....	35
Tabel 4. 1 Tabel Data Analitik.....	39
Tabel 4. 2 Tabel hasil Perhitungan.....	39
Tabel 4. 3 Hasil perhitungan <i>Grid Convergency Index</i> (GCI).....	41
Tabel 4. 4 Tabel hasil <i>timestep independence test</i>	42
Tabel 4. 5 Data torsi hasil simulasi pada <i>head</i> 3m.....	42
Tabel 4. 6 Data torsi hasil simulasi pada <i>head</i> 4m.....	43
Tabel 4. 7 Data torsi hasil simulasi pada <i>head</i> 5m.....	44
Tabel 4. 8 Data daya mekanis hasil simulasi pada <i>head</i> 3m.....	46
Tabel 4. 9 Data daya mekanis hasil simulasi pada <i>head</i> 4m.....	47
Tabel 4. 10 Data daya mekanis hasil simulasi pada <i>head</i> 5m.....	48
Tabel 4. 11 Data debit hasil simulasi pada <i>head</i> 3m.....	49
Tabel 4. 12 Data debit hasil simulasi pada <i>head</i> 4m.....	50
Tabel 4. 13 Data debit hasil simulasi pada <i>head</i> 5m.....	51
Tabel 4. 14 Data efisiensi hasil simulasi pada <i>head</i> 3m	53
Tabel 4. 15 Data efisiensi hasil simulasi pada <i>head</i> 4m	54
Tabel 4. 16 Data efisiensi hasil simulasi pada <i>head</i> 5m	55
Tabel 4. 17 Hasil ANOVA <i>two way without replication</i>	57

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tantangan terbesar yang sering dialami saat ini oleh seluruh negara termasuk Indonesia adalah krisis energi. Karena semua aktivitas manusia membutuhkan energi, seperti produksi industri, transportasi, dan kegiatan rumah tangga, penggunaan energi sangat penting untuk kelangsungan hidup manusia (Logayah dkk., 2023). Populasi di daerah terpencil Indonesia masih menghadapi kesulitan mendapatkan listrik, terutama di daerah seperti Nusa Tenggara Timur (NTT), Papua, dan Maluku. Menurut data yang dikumpulkan oleh IRENA (*International Renewable Energy Agency*) dan BPS (Badan Pusat Statistik), meskipun Indonesia memiliki rasio elektrifikasi nasional sebesar 99,63% pada tahun 2022, banyak wilayah terpencil masih kekurangan listrik atau tidak stabil (BPS, 2024). Oleh karena itu, penggunaan sumber energi terbarukan merupakan solusi untuk masalah ini. Indonesia memiliki beragam sumber energi terbarukan, seperti radiasi matahari, energi angin, energi air, energi biomassa, energi panas bumi, energi laut, dan lain-lain (Lapisa dkk., 2023).

Saat ini, sumber energi terbarukan yang paling banyak digunakan adalah pembangkit listrik tenaga air (Warjito dkk., 2019). Berdasarkan data dari *International Renewable Energy Agency* (IRENA), Indonesia memiliki potensi pembangkit listrik tenaga air yang sangat besar, dengan kapasitas terpasang pembangkit listrik tenaga air diperkirakan mencapai 75 GW jika teknologi yang tepat diterapkan (IRENA, 2022).

Pembangkit listrik tenaga air biasanya dikategorikan menurut daya nominal turbinnya: besar ($P > 100$ MW), medium ($100 \text{ MW} > 15 \text{ MW}$), kecil ($15 \text{ MW} > 1 \text{ MW}$), mini ($1 \text{ MW} > 100 \text{ kW}$), dan mikro ($100 \text{ kW} > 5 \text{ kW}$) (Picone dkk., 2023). PLTA skala *Pico Hydro* adalah solusi praktis untuk menyediakan listrik ke daerah terpencil dimana sumber listrik terbatas, terutama di daerah dengan aliran air berkelanjutan (Rossi dkk., 2022). Seperti pada daerah pedesaan yang hanya

membutuhkan sedikit listrik setiap hari nya dapat menggunakan skala *pico hydro* ini. *Pico hydro* memberikan pembangkit listrik berbiaya rendah dan menghasilkan polusi rendah (Warjito dkk., 2019). Turbin aksi dengan aliran bebas, seperti turbin pelton atau turbin *crossflow*, umumnya lebih sederhana dan memiliki waktu pengembalian modal yang singkat bahkan dengan daya nominal yang lebih kecil (Picone dkk., 2023). Selain itu, Turbin *crossflow* juga memiliki biaya produksi dan operasional yang relatif lebih rendah karena konstruksinya yang sederhana (Ranjan dkk., 2019). Turbin *crossflow* juga dapat beroperasi pada kondisi *head* rendah (<5 m) dan debit aliran tinggi (Adanta dkk., 2020). Oleh sebab itu, turbin *crossflow* merupakan turbin yang cocok untuk digunakan pada sistem pembangkit listrik tenaga air skala piko, khususnya di daerah terpencil dan di perairan Indonesia.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja turbin *crossflow* dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut seperti konfigurasi sudu atas, dimana konfigurasi sudu cembung tengah lebih efisien dibandingkan dengan kelengkungan untuk memaksimalkan konversi energinya (Adanta dkk., 2024b). Berdasarkan hasil, bilah cembung atas dengan konfigurasi serupa (*leading* atau *trailing*) dengan NACA dianggap lebih baik dibandingkan sudu cembung tengah serta kecepatan air pada bagian atas bilah lebih tinggi daripada pada bagian bawah bilah (Adanta dkk., 2023). Karenanya penelitian ini bertujuan mengkaji tentang hubungan antara bentuk sudu dan efisiensi serta daya mekanis turbin *crossflow* yang didasarkan bahwa persamaan yang tepat untuk mengoptimalkan kinerja turbin *crossflow* pada bagian sudu atas turbin yang masih belum ditemukan. Pengaruh gaya angkat (*lift force*) pada bagian atas berkaitan dengan efisiensi konversi energi. Konfigurasi sudu cembung *trailing edge upper* menjadi usulan dalam penelitian ini.

1.2 Rumusan Masalah

Secara matematika *lower* sudu turbin *crossflow* sudah bisa didefinisikan dengan menggunakan persamaan pendekatan segitiga kecepatan dimana β_1 teridentifikasi 38,9° dan β_2 sebesar 90° serta α_1 sebesar 22°. Peneliti sebelumnya berasumsi bahwa bentuk sudu nya hanya seperti *curvature* biasa, belum ada kajian yang membahas rinci tentang konfigurasi *upper* sudu. Oleh karena itu, penelitian ini akan menganalisis rasio ketebalan pada sudu turbin *crossflow* skala piko dengan

konfigurasi sudu cembung belakang menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics*.

1.3 Batasan Masalah

1. Simulasi dilakukan secara 2D karena dianggap mampu merepresentasikan kondisi sebenarnya (Sammartano dkk., 2013);
2. Pendekatan transien menggunakan *moving mesh*;
3. Pendekatan dua fasa menggunakan *volume of fraction* (VoF) dimana air (*water*) sebagai fasa pertama dan udara (*air*) sebagai fasa kedua;
4. Kondisi simulasi menggunakan pendekatan *pressure-based*, dengan asumsi densitas fluida kerja tidak berubah terhadap waktu;
5. Tinggi jatuh air (*Head*) yang digunakan 3m, 4m, dan 5m;
6. Fluida kerja yang digunakan adalah air dengan $\rho = 998,2 \frac{kg}{m^3}$;
7. Simulasi dilakukan dengan 300-900 rpm;

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari studi ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh rasio ketebalan sudu turbin *crossflow* konfigurasi cembung *trailing edge* skala piko terhadap efisiensinya.
2. Menganalisis pengaruh head terhadap efisiensi turbin *crossflow* konfigurasi cembung *trailing edge* skala piko.
3. Menganalisis besaran daya mekanik dan efisiensi maksimum tiap konfigurasi sudu dan tiap variasi *head*.

1.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan, penelitian ini diharapkan memiliki manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan pengetahuan tentang turbin *crossflow* sebagai salah satu alternatif sumber energi terbarukan yang dapat diterapkan pada daerah terpencil dan perairan di Indonesia.
2. Sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya dalam perancangan turbin *crossflow* skala piko.
3. Mengusulkan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD) untuk memprediksi performa turbin *crossflow* hasil perancangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Achebe, C.H., Okafor, O.C., Obika, E.N., 2020. Design and implementation of a crossflow turbine for Pico hydropower electricity generation. *Heliyon*, 6 (7): 3. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04523>
- Adanta, D., Saputra, I., Sari, D.P., Syofii, I., Thamrin, I., Yani, I., Costa, A., Prakoso, A.T., Fudholi, A., Wadirin, 2024a. Investigation on the Blade Number of Pico-scale Crossflow Turbine for Low Head by Numerical Method. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 118 (2): 1–12. <https://doi.org/10.37934/arfmts.118.2.112>
- Adanta, D., Sari, D.P., Syofii, I., Prakoso, A.P., Saputra, M.A.A., Thamrin, I., 2023. Performance Comparison of Crossflow Turbine Configuration Upper Blade Convex and Curvature by Computational Method. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 9 (1): 154–165. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-01-012>
- Adanta, D., Sari, D.P., Syofii, I., Thamrin, I., Yani, I., Marwani, Prakoso, A.F.A.P., 2024b. Configuration blade shape for enhancement crossflow turbine performance by the CFD method 1–12.
- Adanta, D., Sari, D.P., Syofii, I., Yadi, F., Arifin, A., Yani, I., Syadhefi, M.W., Fudholi, A., Mohd-Zawawi, F., 2025. Theodorus spiral concept for pico-scale crossflow turbine nozzle design by computational method. *Ocean Engineering*, 320 (August 2024): 120333. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120333>
- Adanta, D., Warjito, Budiarto, Prakoso, A.P., Wijaya, E.P., 2020. Effect of blade depth on the energy conversion process in crossflow turbines. *CFD Letters*, 12 (1): 123–131.
- Adhikari, R., Wood, D., 2018. The design of high efficiency crossflow hydro turbines: A review and extension. *Energies*, 11 (2): 1–18. <https://doi.org/10.3390/en11020267>
- Aliman, I., Kurniawati, I., Wulandari, J.A., Sutikno, P., 2018. Evaluation design and simulation of three-way nozzle and control flow vane nozzle on cross flow water turbine for various head. *AIP Conference Proceedings*, 1984 (July). <https://doi.org/10.1063/1.5046631>
- Anand, R.S., Jawahar, C.P., Bellos, E., Malmquist, A., 2021. A comprehensive review on Crossflow turbine for hydropower applications. *Ocean Engineering*, 240 (November 2020): 1. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110015>
- ANSYS Fluent Theory Guide, 2013. ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc., USA, 15317 (November): 814.
- BPS, 2024. Rasio Elektrifikasi, 2021-2022.
- Chandra Adhikari, R., 2016. Design improvement of crossflow hydro turbine 239. <https://doi.org/10.11575/PRISM/25581>

- De Andrade, J., Curiel, C., Kenyery, F., Aguilin, O., Vásquez, A., Asuaje, M., 2011. Numerical investigation of the internal flow in a Banki turbine. *International Journal of Rotating Machinery*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/841214>
- Du, J., Shen, Z., Yang, H., 2020. Study on the effects of runner geometries on the performance of inline cross-flow turbine used in water pipelines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40 (May): 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100762>
- Fahdita, Muthahhari, A.A., 2020. Evaluasi Buka Wicket Gate Dan Pintu Air Terhadap Putaran Generator Pada Very Low Head Water Turbine. *Gastronomía ecuatoriana y turismo local.*, 1 (69): 5–6.
- Felix Adityo Rachman, Arief Goeritno, 2024. Pembuatan Turbin Air Tipe Crossflow sebagai Penggerak Generator Fase-tunggal pada Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro. *JuTEkS (Jurnal Teknik Elektro dan Sains)*, 10 (2): 62–67. <https://doi.org/10.32832/juteks.v10i2.15899>
- Hasibuan, B.A., Siahaan, J.C., Harianda, I., 2022. Analisis Unjuk Kerja Turbin Air Kapasitas 3×6 Mw Pada Beban Normal Dan Beban Puncak Di Unit Plta Pakkat Pt. Energy Sakti Santosa. *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 3 (1): 13–22. <https://doi.org/10.51510/sinergipolmed.v3i1.701>
- Insanto, M.W., Adiwibowo, P.H., 2020. Eksperimental Pengaruh Variasi Rasio Sudu Berpenampang Datar Terhadap Daya Dan Efisiensi Turbin Reaksi Crossflow Poros Horizontal. *Jurnal Teknik Mesin*, 8 (1): 93–102.
- Irawan, H., Mujiburrahman, 2019. Perancangan Turbin Air Tipe Crossflow Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro. *Al-Jazari Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 4 (1): 46–50. <https://doi.org/10.31602/al-jazari.v4i1.1981>
- IRENA, 2022. Indonesia Energy Transition Outlook.
- Kaniecki, M., Steller, J., 2003. Flow Analysis through a Reaction Cross-Flow Turbine. *Proceedings of Conference on modelling fluid flow CMFF*, 3 (September 2003): 2003--06.09.
- Kaunda, C.S., Cuthbert Z. Kimambo, Nielsen, T.K., 2014. A numerical investigation of flow profile and performance of a low cost Crossflow turbine. *Journal Of Energy*, 1 (3): 427–446.
- Kaunda, C.S., Kimambo, C.Z., Nielsen, T.K., Journal, I., 2014. Experimental study on a simplified crossflow turbine. *Int. J. Energy Environ*, 5 (2): 155–182.
- Lapisa, R., Karudin, A., Krismadinata, K., Putri, P.Y., Adri, J., Saputra, F.O., Saputra, D., Alfarizi, A., 2023. Cross-Flow Turbine Design of Micro hydro Power Generator for Rural Energy-Independent Area. *MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, 5 (2): 233–244. <https://doi.org/10.46574/motivection.v5i2.163>
- Logayah, D.S., Rahmawati, R.P., Hindami, D.Z., Mustikasari, B.R., 2023. Krisis Energi Uni Eropa: Tantangan dan Peluang dalam Menghadapi Pasokan Energi yang Terbatas. *Hasanuddin Journal of International Affairs*, 3 (2): 102–110. <https://doi.org/10.31947/hjirs.v3i2.27052>
- Mockmore, C.A., Merryfield, F., 1949. The Banki Water turbine.

- Picone, C., Sinagra, M., Aricò, C., Tucciarelli, T., 2021. Numerical analysis of a new cross-flow type hydraulic turbine for high head and low flow rate. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15 (1): 1491–1507. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1974559>
- Picone, C., Sinagra, M., Gurnari, L., Tucciarelli, T., Filianoti, P.G.F., 2023. A New Cross-Flow Type Turbine for Ultra-Low Head in Streams and Channels. *Water (Switzerland)*, 15 (5). <https://doi.org/10.3390/w15050973>
- Prakoso, A.P., Warjito, Siswantara, A.I., Budiarto, Adanta, D., 2019. Comparison between 6-DOF UDF and moving mesh approaches in CFD methods for predicting cross-flow pico-hydro turbine performance. *CFD Letters*, 11 (6): 86–96.
- Ranjan, R.K., Alom, N., Singh, J., Sarkar, B.K., 2019. Performance investigations of cross flow hydro turbine with the variation of blade and nozzle entry arc angle. *Energy Conversion and Management*, 182 (May 2018): 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.075>
- Risdianto, Erlanda Augupta Pane, Rizky, Ismail, 2019. Experimental Study of Crossflow Turbines with Variations Flow Guide in Runner for Sea Wave Power Plants. 9 17.
- Roache, P.J., 1998. Verification of codes and calculations. *AIAA Journal*, 36 (5): 696–702. <https://doi.org/10.2514/2.457>
- Rossi, M., Renzi, M., Ștefan, D., Muntean, S., 2022. Small-Scale Hydropower and Energy Recovery Interventions: Management, Optimization Processes and Hydraulic Machines Applications, Sustainability (Switzerland). <https://doi.org/10.3390/su141811645>
- Sammartano, V., Aricò, C., Carravetta, A., Fecarotta, O., Tucciarelli, T., 2013. Banki-Michell optimal design by computational fluid dynamics testing and hydrodynamic analysis. *Energies*, 6 (5): 2362–2385. <https://doi.org/10.3390/en6052362>
- Sinagra, M., Picone, C., Picone, P., Aricò, C., Tucciarelli, T., Ramos, H.M., 2022. Low-Head Hydropower for Energy Recovery in Wastewater Systems. *Water (Switzerland)*, 14 (10). <https://doi.org/10.3390/w14101649>
- Sugiri, A., Rifai, F., Irsyad, M., Riszal, A., 2024. Pengaruh Variasi Jumlah Sudu dan Twist Angle Terhadap Performa Turbin Heliks Menggunakan Metode CFD. 15 0–6.
- Warjito, Budiarto, Kevin, C., Adanta, D., Prakoso, A.P., 2019. Computational methods for predicting a pico-hydro cross-flow turbine performance. *CFD Letters*, 11 (12): 13–20.
- Yunus A, C., John M., C., n.d. Fluid Mechanics Fundamental and Applications.