

SKRIPSI

**STUDI PERBANDINGAN KINERJA TURBIN HIDROKINETIK TORNADO
SAVONIUS SEBAGAI HASIL MODIFIKASI TURBIN SAVONIUS**

Oleh

RADITYA YUDISTIRA

NIM. DAB 114 059



JURUSAN/PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS PALANGKARAYA

PALANGKARAYA

2021

**STUDI PERBANDINGAN KINERJA TURBIN
HIDROKINETIK TORNADO SAVONIUS SEBAGAI HASIL
MODIFIKASI TURBIN SAVONIUS**

SKRIPSI


Sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Strata-1 pada
Jurusan/Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya

Oleh:

RADITYA YUDISTIRA
NIM. DAB 114 059

**Disetujui sesuai dengan revisi dalam Form Rekomendasi
dan Berita Acara Ujian Skripsi**

Ketua Penguji/Penguji 1



DWI ANUNG NINDITO, S.T., M.T.
NIP. 197610262003121001

Sekretaris/Penguji 2



RADEN HARYO SAPUTRA, M.T.
NIP. 197510122003121002

Mengetahui:

Jurusan/Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya

Ketua



Dr. RUDI WALUYO, S.T., M.T.
NIP. 19780608 200501 1 003

STUDI PERBANDINGAN KINERJA TURBIN HIDROKINETIK TORNADO SAVONIUS SEBAGAI HASIL MODIFIKASI TURBIN SAVONIUS

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan
Program Strata-1 Pada Jurusan/Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya



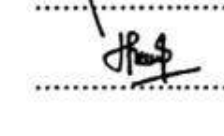
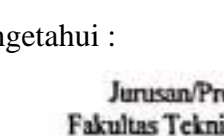
Oleh :

RADITYA YUDISTIRA
NIM. DAB 114 059

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji, pada :

Hari/Tanggal : Jum'at, 28 Mei 2021
Waktu : 13.00 - 15.00 WIB
Tempat : Ruang Sidang Jurusan Teknik Sipil

Tim Penguji :

- | | |
|--|---|
| 1. DWI ANUNG NINDITO, S.T., M.T.
NIP. 197610262003121001 | 
..... (Ketua Penguji/Penguji 1) |
| 2. RADEN HARYO SAPUTRA, M.T.
NIP. 197510122003121002 | 
..... (Sekretaris/Penguji 2) |
| 3. Dr. Ir. I MADE KAMIANA, M.T.
NIP. 196208181990021001 | 
..... (Penguji 3) |
| 4. NOMERITAE. S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197911092003122002 | 
..... (Penguji 4) |

Mengetahui :

Fakultas Teknik
Universitas Palangka Raya


Ir. WALUYO NUSWANTORO, M.T.
NIP. 194511191993021001

Jurusan/Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya

Ketua,

Dr. RUDI WALUYO, S.T., M.T.
NIP. 197806082005011003

BIODATA MAHASISWA



Data Pribadi

Nama : RADITYA YUDISTIRA
NIM : DAB 114 059

Tempat, Tgl lahir : Jakarta, 16 November 1996
Status : Mahasiswa S1
Agama : Islam
Pekerjaan : Mahasiswa
Alamat : Jl. Piranha VII no 11, Palangkaraya
No. Telp. Rumah : -
Alamat Asal : Jl. Piranha VII no 11, Palangkaraya
Email : radityayudistira96@gmail.com
No. Hp : 085393042243
No WA : 085393042243
Facebook : Raditya Yudistira
Instagram : Raditya Yudistira
Nama Ayah : Djadja Sutedja
Pekerjaan Ayah : Pegawai Swasta
Alamat : Jl. Piranha VII no 11, Palangkaraya
No. Hp : 082110457383
Nama Ibu : Emilia
Pekerjaan Ibu : Pegawai Swasta
Alamat : Jl. Piranha VII no 11, Palangkaraya
No. Hp : 081513561525

Riwayat Pendidikan*)

- TK : TK AMALIA (2001-2002)
- SD : SD Negeri CIRENDEU I (2002-2008)
- SLTP : SMP Negeri 164 Jakarta (2008-2010)
: SMPN 3 Palangkaraya (2010-2011)
- SLTA : SMA Negeri 2 Palangka Raya (2011-2014)
- Mulai mengikuti perkuliahan Program Strata-1 pada jurusan/ Program Studi Teknik Sipil Universitas Palangka Raya bulan Agustus 2014

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan dengan sungguh, bahwa Skripsi/Tugas Akhir saya belum dipakai sebelumnya untuk memperoleh gelar kesarjanaan diperguruan tinggi manapun. Segala kutipan dan pikiran dari berbagai sumber yang diungkapkan sebagaimana disebutkan lengkap dalam daftar pustaka. Apabila kemudian ternyata pernyataan saya ini tidak benar, maka saya bersedia menerima segala konsekuensi akibat ketidak benaran pernyataan saya.

Palangka Raya, Juli 2021

Yang membuat pernyataan



RADITYA YUDISTIRA

NIM. DAB 114 059

LEMBAR PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur yang mendalam, skripsi ini dapat diselesaikan. Untuk yang pertama skripsi ini saya persembahkan Untuk Kedua Orang Tua saya Terima kasih atas segala perjuangan, dukungan, semangat dan suntikan dana yang selalu diberikan. Makasih ya Papah dan Mamah, selalu mendoakan aku. Terima kasih untuk selalu memberikan nasihat, kekuatan agar dapat melewati semuanya dengan baik.

Terima kasih banyak untuk adik dan kakak ku, yang selalu menolong kapan pun dan di manapun, memberikan semangat, dukungan doa dan menjadi sumber informasi dan sumber ilmu untuk saya mengerjakan Skripsi ini.

Terima kasih banyak kepada dosen pembimbing saya, Bapak Dwi Anung Nindito, S.T., M.T., dan Bapak Raden Haryo Saputra, M.T. yang telah membimbing dan mengarahkan pada saat penulisan Skripsi ini. Serta terimakasih kepada dosen penguji Bapak Dr. Ir. I Made Kamiana, M.T., Ibu Nomeritae, S.T., M.Eng., Ph.D., dan selaku moderator Bapak Haiki Mart Yupi, S.T., M.T., Ph.D. yang telah memberikan masukan-masukan yang sangat penting kepada saya sehingga terselesaikannya Skripsi ini.

Terima kasih juga kepada Jurusan dan Ibu Frieda, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik saya yang selalu membantu kendala perkuliahan saya.

Terima kasih untuk teman-teman Hydrokinetic Turbine, Alfred Maruli, Try Antomo, Adri Pratama, Elia Sucie, Citra Wardani, Dheasy Ayuningtyas, atas waktu yang telah diluangkan dan tenaga yang diberikan untuk penelitian ini.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas segala berkat dan penyertaan dari Tuhan Yang Maha Esa, karena atas penyertaan-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.

Skripsi dengan judul “**STUDI PERBANDINGAN KINERJA TURBIN HIDROKINETIK TORNADO SAVONIUS SEBAGAI HASIL MODIFIKASI TURBIN SAVONIUS**” disusun sebagai salah satu syarat, yang harus dilaksanakan untuk menyelesaikan studi Program Strata-1, pada Jurusan/Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Ir. Waluyo Nuswantoro, M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya.
2. Ibu Frieda, S.T., M.T. selaku Wakil Dekan I Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya sekaligus Dosen Pembimbing Akademik.
3. Bapak Dr. Sutan Parasian Silitonga, S.T.P., S.T., M.T. selaku Wakil Dekan II Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya.
4. Bapak Tatau Wijaya Garib, S.T., M.T. selaku Wakil Dekan III Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya.
5. Bapak Dr. Rudi Waluyo, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan/Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya.
6. Bapak Dwi Anung Nindito, S.T., M.T. selaku dosen penguji I Skripsi.
7. Bapak Raden Haryo Saputra, M.T. selaku dosen penguji II Skripsi.
8. Bapak Dr. Ir. I Made Kamiana, M.T. selaku dosen penguji III skripsi.
9. Ibu Nomeritae, S.T., M.Eng., P.hD. selaku dosen penguji IV skripsi.
10. Seluruh Dosen Jurusan/Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya.
11. Staf Tata Usaha Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya.
12. Keluarga dan teman-teman mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya khususnya kepada Angkatan 2014 Teknik Sipil dan kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan dan penyelesaian skripsi ini.

Akhir kata dengan segala kerendahan hati dan menyadari akan segala kekurangan dalam penyajian Skripsi ini, penulis harapkan berbagai tanggapan, kritik dan saran yang sifatnya membangun demi perbaikan di masa yang akan datang. Terima kasih.

viii Palangka Raya, Juli 2021

Raditya Yudistira

NIM. DAB 114 059

RINGKASAN

Salah satu alternatif penyelesaian ketergantungan energi fosil di Indonesia khususnya dan di dunia pada umumnya yaitu *renewable energy* seperti energi angin, energi air, dan energi *geothermal* (panas bumi). Salah satu pemanfaatan energi air adalah hidrokinetik turbin yang dapat langsung dikonversi menjadi energi lainnya seperti energi listrik. Penggunaan hidrokinetik turbin pada aliran sungai masih kurang diminati, karena faktor distribusi kecepatan aliran sangat berpengaruh pada turbin yang bergerak pada aliran sungai. Perlu dilakukan inovasi pada *blade* turbin Savonius untuk mengoptimalkan pola distribusi kecepatan aliran air. Prinsip distribusi kecepatan aliran inilah yang mendasari inovasi turbin Savonius yaitu turbin Tornado Savonius.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja turbin hidrokinetik Tornado Savonius dan turbin Savonius. Inovasi yang dilakukan yaitu memodifikasi bentuk *blade* sehingga membentuk pola distribusi kecepatan aliran yang kecil pada bagian bawah dan membesar pada bagian atasnya. Parameter yang diukur dalam studi ini adalah kecepatan aliran, kedalaman air, torsi dan Rotasi Per Menit (RPM).

Pada kondisi kedalaman air sama dengan tinggi turbin, turbin Tornado Savonius memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan kinerja turbin Savonius. Hasil pengujian turbin Tornado Savonius menunjukkan nilai *Coefficient of Power* (C_P) dan *tip speed ratio* (λ) turbin Tornado Savonius 0,091–0,422 dan 0,895–1,843 lebih tinggi dibandingkan dengan turbin Savonius dengan nilai *Coefficient of Power* (C_P) 0,057–0,270 dan *tip speed ratio* (λ) 0,508–0,929.

Kata kunci: savonius, hidrokinetik, tornado savonius, distribusi kecepatan aliran.

SUMMARY

One of alternative solution to fossil energy dependence in Indonesia in particular and in the world in general is renewable energy such as wind energy, water energy, and geothermal energy (geothermal). One of the uses of water energy is hydrokinetic turbines that can be directly converted into other energy such as electrical energy. The use of hydrokinetic turbines in the river flow is still less in demand, because the flow speed distribution factor is very influential on turbines that move in the river flow. Innovations are needed on Savonius turbine blades to optimize the distribution pattern of water flow speed. It was this principle of flow speed distribution that underpinned Savonius' turbine innovation, the Tornado Savonius turbine.

This research was conducted to determine the performance of Tornado Savonius hydrokinetic turbines and Savonius turbines. The innovation is to change the shape of the blade so that it forms a small flow speed distribution pattern at the bottom and enlarges at the top. Parameters measured in this study were flow speed, water depth, torque and Rotation Per Minute (RPM).

In water depth conditions similar to turbine height, Tornado Savonius turbines performed better than Savonius turbines. Tornado Savonius turbine test results showed coefficient of power (C_p) and tip speed ratio (λ) of Tornado Savonius turbines 0.091–0.422 and 0.895–1.843 higher than Savonius turbines with a Coefficient of Power (C_p) value of 0.057–0.270 and a tip speed ratio (λ) of 0.508–0.929.

Keywords: *savonius, hydrokinetic, tornado savonius, flow velocity distribution.*

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
BIODATA MAHASISWA	iii
SURAT PERNYATAAN	iv
LEMBAR PERSEMBAHAN	v
RINGKASAN	vi
SUMMARY	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR NOTASI	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
1.5 Tujuan Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Umum.....	6
2.2 Evolusi Rotor.....	9
2.3 Jenis-Jenis Penambahan pada Turbin.....	17
2.4 Bagian-Bagian Rotor Savonius	26
2.5 Saluran Prismatik (Flume)	27
2.6 Kinerja Turbin Savonius	27
2.6.1 Parameter <i>Performance</i>	27
2.6.2 Parameter <i>Drag and Lift</i>	28
2.6.3 <i>Betz Limit</i>	29
2.7 Parameter Kinerja Turbin	30

2.7.1 RPM	30
2.7.2 TSR (λ).....	30
2.7.3 Torsi (τ)	31
2.7.4 Koefisien Torsi ($C\tau$).....	31
2.7.5 <i>Power of Coefficient</i> (C_p).....	31
2.8 Hubungan Antar Parameter Turbin	32
2.8.1 Hubungan Antara TSR dan C_p	32
2.8.2 Hubungan Antara RPM dengan Variasi Kecepatan Aliran Air	33
2.8.3 Hubungan Antara Torsi dan Sudut Rotasi Untuk Variasi <i>Flaps</i>	34
2.8.4 Hubungan Antara C_p dan Variasi Sudut Pelat Deflektor ...	35
2.8.5 Hubungan Antara RPM dengan Kecepatan Aliran Untuk Variasi Kecepatan Rata-Rata dari Sudu <i>Twisted Rotor</i>	36
2.8.6 Hubungan C_p dengan Kecepatan untuk <i>Valve-Aided Twisted Savonius</i> (VATS) Rotor	37
2.8.7 Hubungan Variasi C_p dengan TSR untuk Berbagai Konfigurasi Rotor.....	38
2.8.8 Hubungan Antara C_p dengan TSR di Berbagai Orientasi Dari Konsentrator.....	39
2.8.9 Hubungan antara RPM Terhadap Torsi (Nm)	40
2.8.10 Hubungan antara Kecepatan (m/s) Terhadap C_p	41
2.8.11 Hubungan antara TSR dan $C\tau$	42
2.8.12 Hubungan antara Kecepatan (m/s) dan $C\tau$ (Nm)	43
2.8.13 Hubungan antara RPM dan C_p	44

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Umum.....	45
3.2 Diagram Alir Penelitian.	46
3.3 Studi Pustaka.	48

3.4	Komponen Turbin	48
3.5	Pembuatan Turbin.	48
3.6	Alat-Alat yang Digunakan Dalam Pengujian.....	50
3.7	Pengambilan Variasi <i>Running</i>	53
3.8	Parameter Penelitian.	54
3.9	Parameter yang diukur.	55
3.10	Perbandingan Kinerja Turbin.....	56

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1	Desain Tornado Savonius	57
4.2	Perbandingan Kinerja dari Turbin Savonius dengan Turbin Tornado Savonius.	62
4.2.1.	Hubungan antara RPM dan Torsi	68
4.2.2.	Hubungan antara Kecepatan Aliran Air dan C_p	69
4.2.3.	Hubungan antara TSR dan C_t	70
4.2.4.	Hubungan antara Kecepatan Aliran Air dan C_t	71
4.2.5.	Hubungan antara RPM dan C_p	72
4.2.6.	Hubungan antara C_p dan TSR.....	73

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	76
5.2	Saran	77

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Komponen Parameter Turbin	48
Tabel 3.2 Pengambilan Variasi <i>Running</i>	53
Tabel 4.1 Perbedaan Desain Tornado Savonius dengan Desain Savonius ..	61
Tabel 4.2 Form Pengambilan Data.....	63

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Perbandingan Turbin Konvensional dan Hidrokinetik Turbin ..	2
Gambar 1.2 Penggunaan Saluran dan Pengaplikasiannya	2
Gambar 1.3 Efek Kekasaran Terhadap Distribusi Kecepatan di Saluran Terbuka	3
Gambar 2.1 <i>Vertical-Axis</i> Turbin	8
Gambar 2.2 Model <i>Semicircular Blade</i> Savonius	9
Gambar 2.3 Model <i>Twiste</i> Savonius	10
Gambar 2.4 Tampak Atas 2D <i>Batch</i>	10
Gambar 2.5 Prototipe Rotor <i>Fish-Ridge</i> dan Alat Uji Terowongan Angin ...	11
Gambar 2.6 Tampak Atas 2D <i>Elliptical</i>	11
Gambar 2.7 Tampak Atas 2D <i>Modified Bach</i>	12
Gambar 2.8 Tampak Atas 2D <i>Roy Profile</i>	13
Gambar 2.9 Bronzinus Rotor dengan Empat Sudu	13
Gambar 2.10 Desain <i>Spinning Top Darrieus</i>	14
Gambar 2.11 Perbedaan Bentuk Rotor <i>Multiple Quarter Semicircular</i> dan Rotor <i>Semicircular</i>	14
Gambar 2.12 Bentuk Rotor <i>Multiple Miniature Semicircular</i>	15
Gambar 2.13 Desain Turbin DNA.	16
Gambar 2.14 Penambahan Jenis <i>Wind Shield</i>	17
Gambar 2.15 Alat Uji <i>Deflector Plates</i>	18
Gambar 2.16 <i>Slatted Blade</i>	19
Gambar 2.17 Diagram Skematis Pengujian <i>V-Shaped Deflectors</i>	20
Gambar 2.18 Savonius Empat Sudu dengan <i>Nozzle</i>	20
Gambar 2.19 Prototipe dari <i>Multistaging</i>	21
Gambar 2.20 <i>Twisted Blade</i>	22

Gambar 2.21	Skema Pengujian <i>Valve</i> dengan Menggunakan Terowongan Angin	23
Gambar 2.22	Tampak Atas Skema Uji Coba <i>Guide Box Tunnel</i>	23
Gambar 2.23	Desain <i>Curtain Plates</i>	24
Gambar 2.24	<i>Circular Shield</i>	24
Gambar 2.25	<i>Venting Slots</i>	25
Gambar 2.26	Sudut Pengarah <i>Guide Vane</i>	25
Gambar 2.27	Bagian-Bagian Rotor Savonius	26
Gambar 2.28	Saluran prismatik	27
Gambar 2.29	Parameter Betz Limit	29
Gambar 2.30	Hubungan antara TSR dan C_P	32
Gambar 2.31	Hubungan antara Rpm dengan Variasi Kecepatan Aliran Air ..	33
Gambar 2.32	Hubungan antara Torsi dan Sudut Rotasi untuk Variasi <i>Flaps</i> .	34
Gambar 2.33	Hubungan antara C_P dan Variasi Sudut Pelat Deflektor	35
Gambar 2.34	Hubungan antara RPM dan Kecepatan Aliran Untuk Variasi Kecepatan Rata-Rata Dari Sudu <i>Twisted Rotor</i>	36
Gambar 2.35	Hubungan antara C_P dengan Kecepatan Untuk <i>Valve-Aided Twisted Savonius (VATS) Rotor</i>	37
Gambar 2.36	Hubungan Variasi C_P Dengan TSR untuk Berbagai Konfigurasi Rotor	38
Gambar 2.37	Hubungan C_P dengan TSR Di Berbagai Orientasi dari Konsentrator	39
Gambar 2.38	Hubungan antara RPM Terhadap Torsi (Nm)	40
Gambar 2.39	Hubungan antara Kecepatan (M/S) Terhadap C_P	41
Gambar 2.40	Hubungan antara TSR dan C_τ	42
Gambar 2.41	Hubungan antara Kecepatan (M/S) dan C_τ (Nm)	43
Gambar 2.42	Hubungan antara RPM dan C_P	44
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	46
Gambar 3. 2	Turbin Savonius	46
Gambar 3. 3	Turbin Tornado Savonius	46
Gambar 3. 4	Saluran Prismatic (<i>Flume</i>)	46

Gambar 4.1	Desain Inovasi Turbin Tornado Savonius	58
Gambar 4.2	<i>Blade</i> atau Sudu	59
Gambar 4.3	As Turbin.....	60
Gambar 4.4	<i>Bearing</i>	60
Gambar 4.5	Dudukan Turbin.....	61
Gambar 4.6	Hubungan antara RPM dan Torsi	69
Gambar 4.7	Hubungan antara Kecepatan dan C_P	70
Gambar 4.8	Hubungan antara TSR dan C_τ	71
Gambar 4.9	Hubungan antara Kecepatan dan C_τ	72
Gambar 4.10	Hubungan antara RPM dan C_P	73
Gambar 4.11	Hubungan antara TSR dan C_P pada Tiap Kedalaman	74
Gambar 4.12	Hubungan antara TSR dan C_P	76

DAFTAR NOTASI

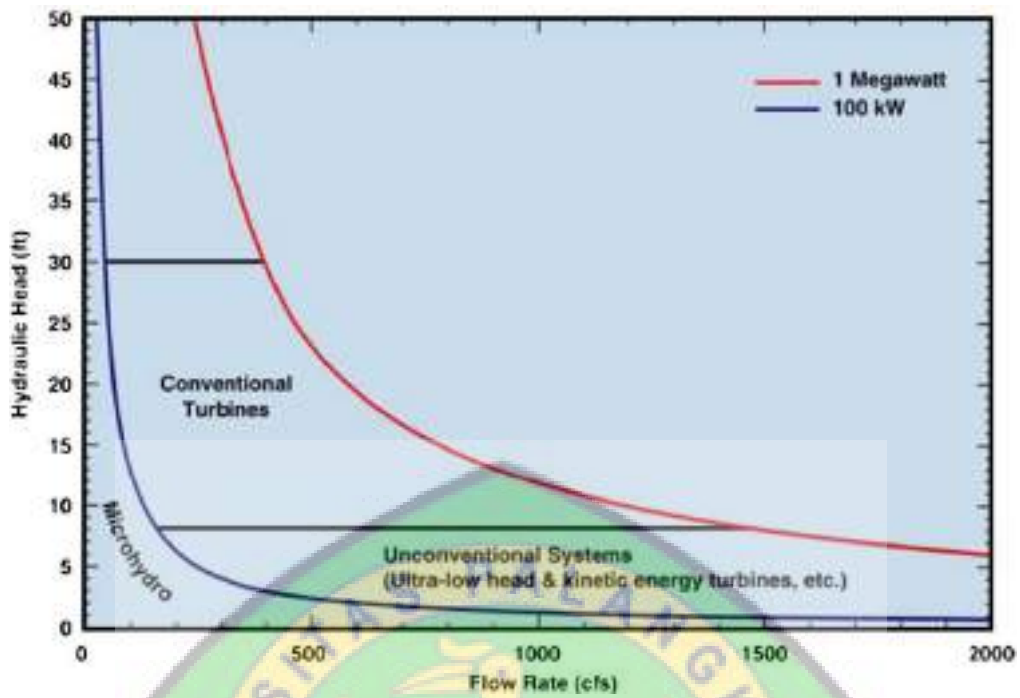
Notasi	Keterangan	Satuan
C_p	<i>Power of Coefficient</i>	
C_τ	Koefisien Torsi	
D	Diameter <i>Blade</i>	Cm
H	Tinggi <i>Blade</i>	Cm
RPM	Putaran rotor	
r	Jari-jari <i>Blade</i>	Cm
v	Kecepatan Aliran Air	m/detik
λ	<i>Tip Speed Ratio</i>	
ρ	Densitas Air	Kg/m^3
τ	Torsi	N.m
ω	Kecepatan Sudut	Rad/detik

BAB I

PENDAHULUAN

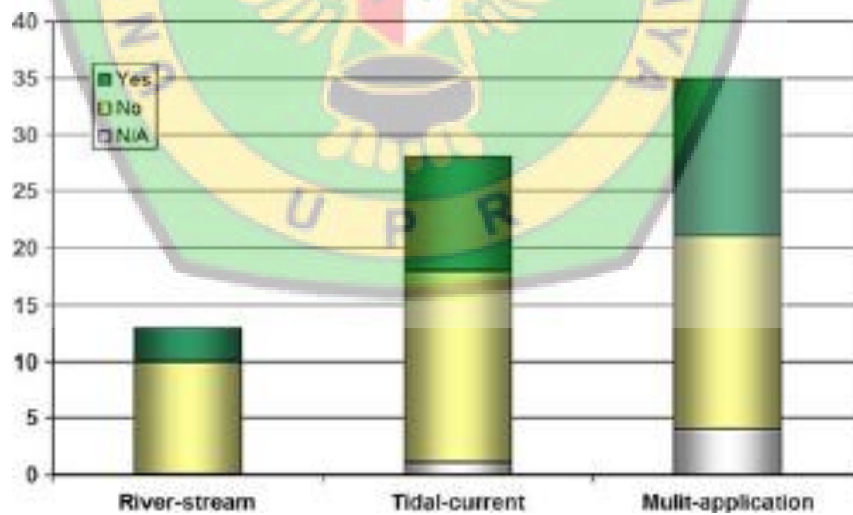
1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi fosil di dunia terus meningkat karena pertambahan penduduk, pertumbuhan ekonomi dan pola konsumsi energi itu sendiri yang senantiasa meningkat. Salah satu alternatif penyelesaian ketergantungan energi fosil di dunia yaitu *renewable energy* seperti energi angin, energi air, dan energi *geothermal* (panas bumi). Indonesia adalah negara yang memiliki sumber daya energi yang sangat melimpah, salah satunya adalah sumber energi air. Penggunaan energi air sendiri mempunyai banyak keuntungan, di antaranya; tidak berakibat polusi dan sumber energi yang tidak akan habis apabila dikelola dengan baik. Salah satu pemanfaatan energi air adalah hidrokinetik turbin yang dapat langsung dikonversi menjadi energi lainnya seperti energi listrik. Adapun dua jenis turbin, yaitu turbin yang bergerak karena *head* yang tinggi dan ada juga turbin yang bergerak dengan *head* yang rendah seperti yang tertera pada Gambar 1.1. Tidak adanya gunung, bendungan dan waduk untuk menggerakkan turbin dengan *head* yang tinggi di Kalimantan Tengah maka penggunaan hidrokinetik turbin dengan *head* yang rendah sangat tepat untuk daerah Kalimantan Tengah.



(Sumber: Hall dkk, 2006)

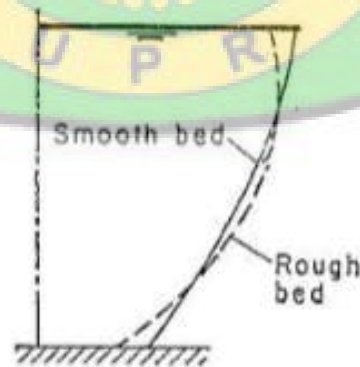
Gambar 1.1 Perbandingan turbin konvensional dan hidrokinetik turbin



(Sumber: Khan dkk. 2009)

Gambar 1.2 Penggunaan saluran dan pengaplikasiannya

Salah satu teknologi yang diciptakan oleh Savonius and Finland (1931) mengenai hidrokinetik turbin dapat mengoptimalkan aliran sungai dengan *head* yang rendah sebagai sumber energi yaitu dengan mengandalkan kecepatan aliran air untuk menghasilkan putaran pada turbin. Tidak seperti turbin konvensional yang memerlukan tinggi jatuh atau *head* yang tinggi. Berdasarkan Gambar 1.2 pengaplikasian hidrokinetik turbin pada aliran sungai atau *river-stream* lebih rendah dibandingkan dengan yang lain. Hal ini disebabkan oleh distribusi kecepatan aliran pada penampang saluran yang kurang memaksimalkan konsep hidrokinetik turbin tersebut. Karena distribusi kecepatan aliran tidak sama sepanjang kedalaman saluran, semakin mendekati permukaan, kecepatan aliran semakin deras. Studi Nindito, Istiarto dan Kironoto (2009) menunjukkan kecepatan aliran yang menuju dinding batas nilainya mengecil dan kecepatan maksimum kecepatan aliran terjadi pada bagian tengah saluran.



(Sumber: Chow, 1959)

Gambar 1.3 Efek kekasaran terhadap distribusi kecepatan di saluran terbuka

Berdasarkan fakta tersebut maka dari itu perlu adanya modifikasi pada bentuk sudu dari hidrokinetik turbin Savonius. Pembuatan hidrokinetik turbin tipe Savonius yang terbilang cukup mudah dan memiliki efisiensi gaya *drag* yang memungkinkan turbin berputar pada kecepatan arus yang rendah sehingga cocok untuk dilakukan modifikasi pada bentuk sudunya. Maka dari itu dengan menggunakan inovasi sudu dari turbin Savonius yaitu *Tornado Savonius* diharapkan dapat memaksimalkan pengaruh dari distribusi kecepatan aliran yang di mana dapat meningkatkan kinerja dari turbin Savonius pada aliran saluran dengan *head* yang rendah.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah diuraikan sebelumnya, maka rumusan masalah studi ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana desain Tornado Savonius?
2. Bagaimana kinerja turbin Savonius dibandingkan dengan turbin Tornado Savonius?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam studi ini:

1. Penelitian ini dilakukan sebatas perhitungan hidrodinamika turbin, tidak membahas sistem kelistrikan.
2. Uji coba dilakukan di saluran prismatic (*flume*).

3. Bentuk sudu turbin Savonius yang digunakan pada penelitian ini didasarkan pada paten No US 1697574A.
4. Tidak dilakukan pengukuran dan peninjauan pengaruh suhu air.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Mendapatkan temuan baru terkait sudu turbin Savonius.
2. Dapat digunakan sebagai sumber informasi bagi masyarakat yang membutuhkan sumber energi alternatif selain sumber energi fosil.
3. Menambah *literature* (pustaka) dan pengetahuan dalam bidang energi terbarukan.

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui desain modifikasi turbin Savonius yang lebih baik dari desain Savonius di aliran akibat pola distribusi kecepatan aliran air.
2. Mengetahui kinerja sudu turbin Tornado Savonius dibandingkan dengan turbin Savonius.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Turbin Hidrokinetik adalah turbin yang digunakan untuk mengkonversi energi kinetik air menjadi energi mekanik turbin. Adapun jenis-jenis turbin hidrokinetik, antara lain:

1. Gorlov

Turbin Gorlov adalah turbin yang dikembangkan pada tahun 1995. Turbin ini mengubah energi kinetik yang dihasilkan oleh arus aliran menjadi energi mekanis. Turbin Gorlov ditemukan oleh Profesor Gorlov dari Northeastern University. Turbin Gorlov dapat bekerja/berputar di arus sungai (*river energy*), arus laut (*marine energy*) dan arus pasang-surut (*tidal energy*).

2. Darrieus

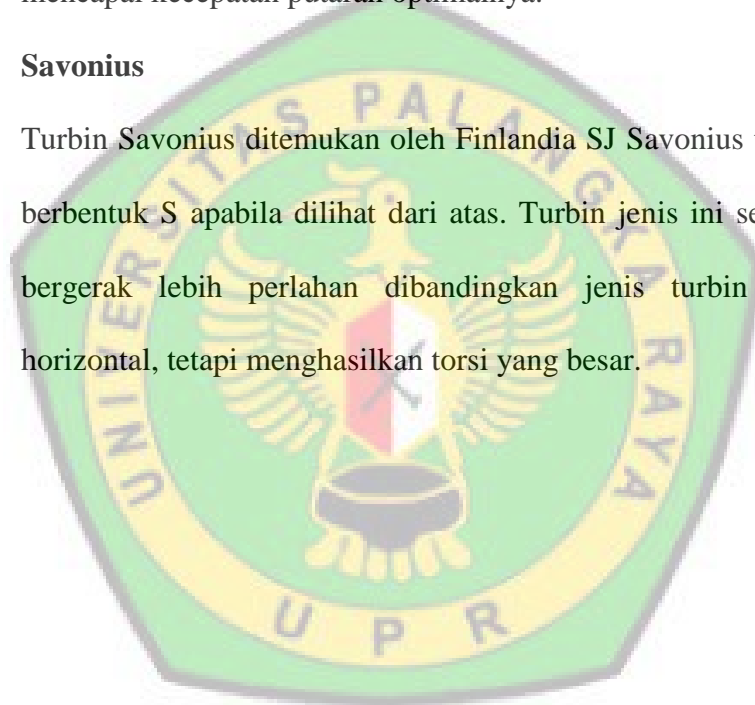
Turbin Darrieus ditemukan oleh George Jean Marie Darrieus yang merupakan seorang insinyur asal Perancis pada tahun 1931. Turbin ini memiliki 2 bentuk diantaranya adalah *Eggbeater/Curved Bladed* dan *Straighbladed*. Posisi *blade* yang disusun dalam posisi simetri cukup efektif dalam menangkap energi dari berbagai arah aliran.

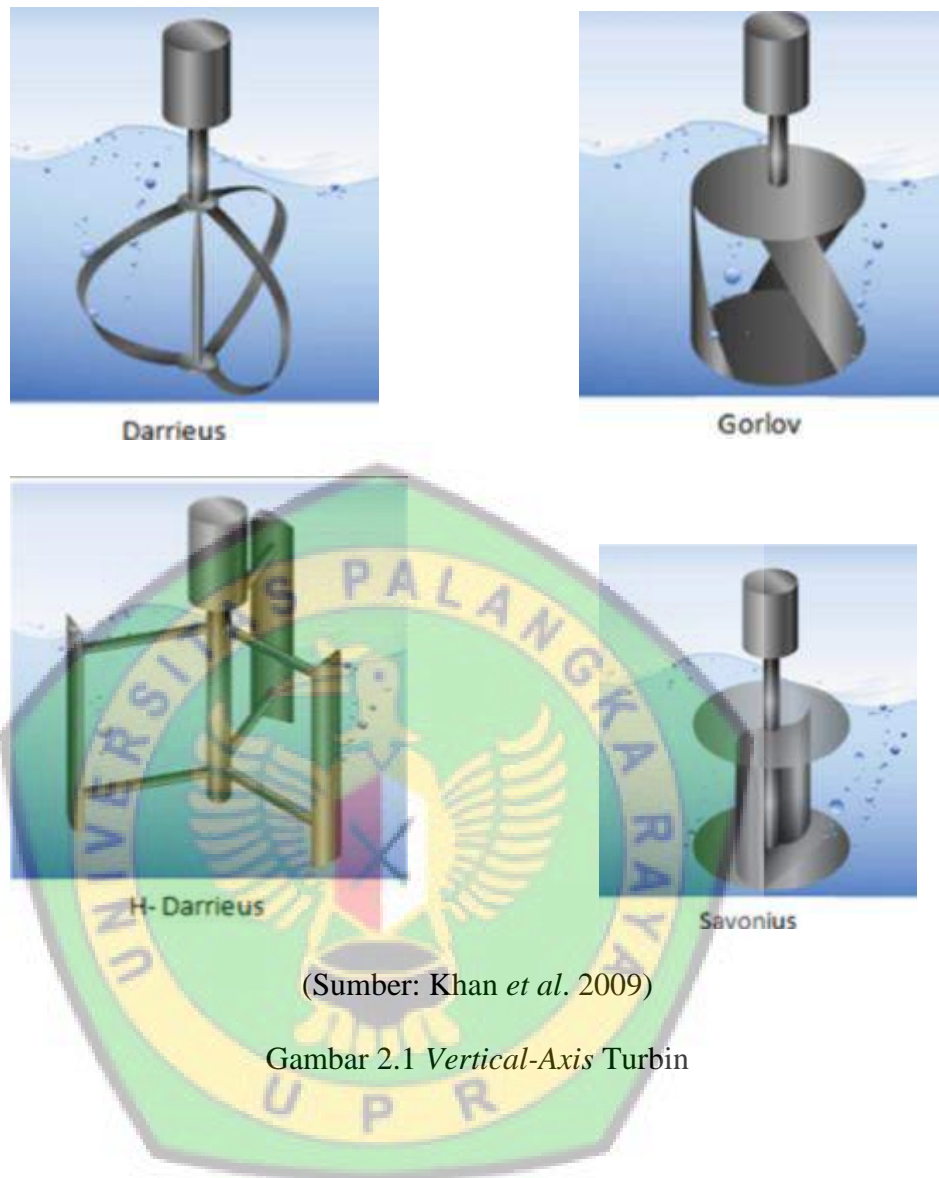
3. H-Darrieus

Turbin H-Darrieus dikembangkan di Inggris melalui penelitian yang dilakukan selama 1970-180an. Bentuk *blade* yang digunakan pada *blade* berbilah lurus (*Straight-bladed*) Darrieus ternyata ditemukan efek hambatan yang diciptakan oleh *blade* akan membatasi kecepatan aliran. Oleh karena itu, H-Darrieus akan mengatur semua kecepatan aliran untuk mencapai kecepatan putaran optimalnya.

4. Savonius

Turbin Savonius ditemukan oleh Finlandia SJ Savonius tahun 1929 dan berbentuk S apabila dilihat dari atas. Turbin jenis ini secara umumnya bergerak lebih perlahan dibandingkan jenis turbin angin sumbu horizontal, tetapi menghasilkan torsi yang besar.





2.2 Evolusi Rotor

Untuk meningkatkan kinerja rotor, beberapa penelitian menemukan jenis-jenis rotor berbeda, di antaranya:

1. *Semicircular*

Pada percobaan yang dilakukan oleh A.J. Alexander dan B.P. Holownia, *Semicircular Blade* Savonius, secara umum dapat mengoptimalkan rotor Savonius tanpa mengurangi desain sederhana Savonius yang sudah ada.



(Sumber: Alexander dan Holownia, 1978)

Gambar 2.2 Model *Semicircular blade* Savonius

2. *Twisted*

Menurut Grinspan, Saha, dan Mahanta (2004) *Twisted Bladed* Savonius dapat meningkatkan kemampuan menangkap energi *blade* secara optimal.



(Sumber: Grinspan, Saha, dan Mahanta, 2004)

Gambar 2.3 Model *Twisted Savonius*

3. *Bach*

Menurut Kacprzak, Liskiewicz, dan Sobczak (2013) Dalam hal koefisien daya, rotor tipe *Bach* lebih unggul dari pada rotor yang diuji lainnya dan pada saat yang sama turbin *Elliptical Savonius* menunjukkan karakteristik daya yang lebih baik daripada Savonius Klasik. Namun, Dalam kisaran TSR antara 0,2 dan 0,4, rotor *Elliptical Savonius* bekerja lebih baik dari pada rotor tipe *Bach* dan rotor Savonius Klasik.

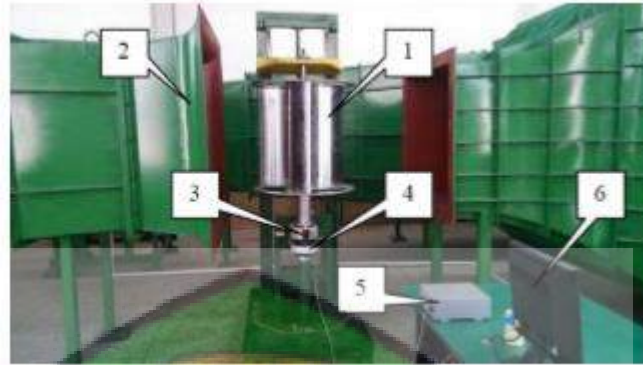
(Sumber: Kacprzak, Liskiewicz, dan Sobczak 2013)

Gambar 2.4 Tampak atas 2D *Bach*

4. *Fish-ridged*

Menurut Song dkk (2013) jenis baru rotor angin bernama *Fish-ridged* terinspirasi berdasarkan cara ikan berenang. Setelah struktur rotor dirancang

dan dianalisis, tes terowongan angin dilakukan untuk mempelajari kinerja rotor. Hasil menunjukkan bahwa rotor tipe baru memiliki kinerja yang baik dan memiliki struktur sederhana.



(Sumber: Song dkk, 2013)

Gambar 2.5 Prototipe rotor *Fish-ridged* dan alat uji terowongan angin

5. *Elliptical*

Hasil percobaan yang dilakukan pada terowongan angin pada kecepatan angin 6,2 m/s lalu dibandingkan dengan dengan rotor *semicircular*. Hasil menunjukkan peningkatan dalam *power of coefficient* (C_p). (Banerjee dkk, 2014)



(Sumber: Song dkk, 2013)

Gambar 2.6 Tampak atas 2D *elliptical*

6. *Modified Bach*

Modified Bach dikembangkan melalui serangkaian simulasi numerik pada tipe *bach*. Model rotor turbin ini juga diuji masing-masing dan rotor *Modified Bach* dikonfirmasi dapat menaikkan 10% kinerja dari deflektor yang diposisikan di depan sudu (Roy, Mukherjee, dan Saha 2014).

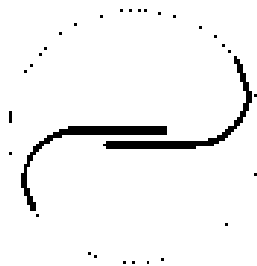


(Sumber: Roy, Mukherjee, dan Saha, 2014)

Gambar 2.7 Tampak atas 2D *Modified Bach*

7. *Roy Profile*

Dari studi perbandingan, rotor Savonius *Roy profile* memiliki kenaikan kinerja 24,2%. Dibandingkan tipe *semicircular* rotor dan 5,1% tipe *Bach* yang dimodifikasi. (Roy, Mukherjee, dan Saha 2014)



(Sumber: Roy, Mukherjee, dan Saha 2014)

Gambar 2.8 Tampak atas 2D *Roy Profile*

8. Bronzinus

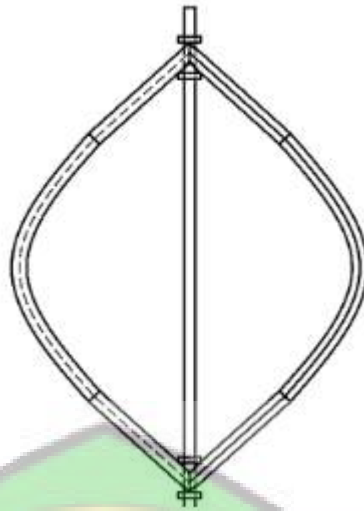
Bronzinus adalah sebuah usulan dari perusahaan Italia dan Universitas Italia bekerja sama dengan Konstruktor bangunan swasta Lebanon. Bronzinus didesain ulang dari turbin Savonius yang diusulkan menggunakan perangkat lunak CAD dan melakukan simulasi perilaku virtual rotor menggunakan perangkat lunak CFD (*Computational Fluid Dynamics*).



Gambar 2.9 Bronzinus rotor dengan empat sudu

9. *Spinning Top Darrieus*

Wardani, Nindito dan Jaya, (2020) melakukan inovasi terhadap turbin Darrieus yaitu turbin *Spinning Top Darrieus* yang berbentuk *circular-arc* (lengkung) dan garis lurus, dengan membentuk *blade* seperti profil distribusi kecepatan aliran di 0,2h, 0,6h dan 0,8h dari bagian atas turbin.



(Sumber: Wardani, Nindito dan Jaya, 2020)

Gambar 2.10 desain *Spinning Top Darrieus*

10. *Multiple quarter semicircular*



(Sumber: Sharma dan Sharma, 2016)

Gambar 2.11 Perbedaan bentuk rotor *Multiple quarter semicircular* dan rotor *semicircular*.

Dalam studi perbandingan, konfigurasi baru diamati memiliki kinerja yang lebih baik daripada konfigurasi konvensional untuk semua kasus kecepatan *input* yang berbeda, mencapai nilai C_P maksimum 0,2266 untuk $V = 8,23$ m / s dengan peningkatan 8,89%.(Sharma dan Sharma, 2016).

11. *Multiple miniature semicircular*



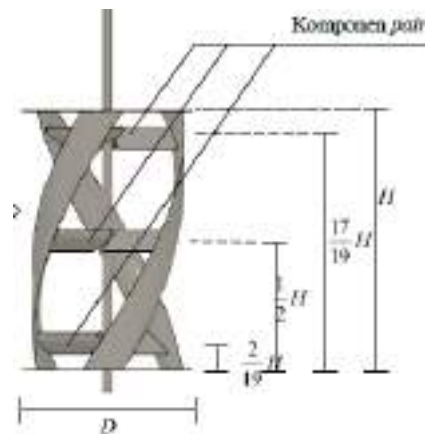
(Sumber: Sharma dan Sharma, 2017)

Gambar 2.12 Bentuk rotor *Multiple miniature semicircular*.

Peningkatan luar biasa dikonfirmasi dengan penggunaan bilah miniatur berlapis pada kinerja konfigurasi dasar rotor Savonius rotor. Efisiensi energi rotor adalah ukuran kemampuannya untuk mengubah energi angin yang tersedia menjadi energi mekanik dan direpresentasikan sebagai C_P . Peningkatan C_P maksimum diamati 11,34% untuk $V = 9,21$ m/s. (Sharma dan Sharma, 2017).

12. DNA Turbin

Antomo, Kamiana dan Nindito (2020) melakukan penelitian terhadap pengaruh penambahan komponen *pair* pada turbin Gorlov. Turbin tersebut dinamakan turbin DNA. Penambahan *pair* mengakibatkan RPM turbin DNA lebih rendah dibandingkan dengan turbin Gorlov, akan tetapi turbin DNA menghasilkan nilai torsi yang lebih tinggi dari pada turbin Gorlov.



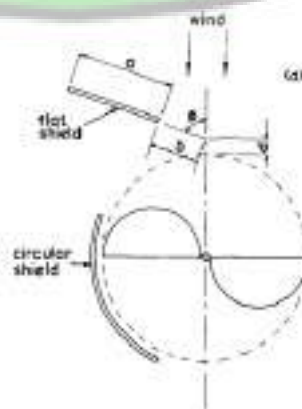
(Sumber: Antomo, Kamiana dan Nindito, 2020)

Gambar 2.13 desain turbin DNA.

2.3 Jenis-Jenis Penambahan Pada Turbin.

1. *Wind Shield*

Wind Shield biasanya dipasang di depan *returning blade* rotor savonius. *Wind shield* ini biasanya berbentuk bundar atau datar. Alexander dan Holownia (1978). Setelah dilakukan percobaan di dalam terowongan angin berkecepatan rendah, kinerja rotor Savonius dengan menggunakan *wind shield* meningkat sebesar 74%. (Morcos, Khalafallah, dan Heikel, 1981)



(Sumber: Alexander dan Holownia, 1978)

Gambar 2.14 Penambahan jenis *wind shield*.

2. *Deflector Plates*

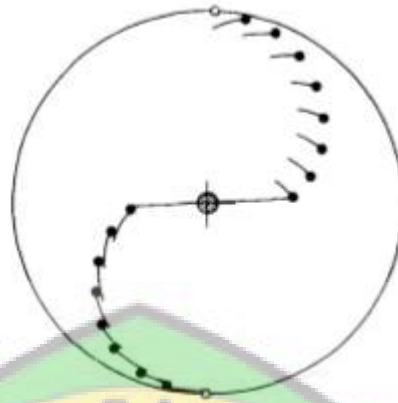
Biasanya, *Deflector Plates* dipasang di depan *returning blade* untuk mengurangi gaya luar yang bekerja pada rotor Savonius. Setelah dilakukan beberapa percobaan pada terowongan angin ditemukan bahwa CP meningkat 27%. (Ogawa, Yoshida, dan Yokota, 1989) Pada tahun 2011 Golecha melakukan percobaan dengan menggunakan *Deflector Plates* pada turbin Savonius yang dimodifikasi, dari percobaan tersebut didapat *Deflector Plates* dapat meningkatkan kinerja sebesar 50% lebih besar dari pada turbin Savonius konvensional.



3. *Slatted blade*

Reupke dan Probert (1991) mengusulkan untuk menggunakan beberapa *flaps* dari pada menggunakan sudu rotor kontinu. *Flap* ini terbuka ketika bergerak ke angin, sehingga mengurangi gaya hambat negatif pada bilah rotor. *Flap* terbuka secara otomatis ketika rotor bergerak maju ke arah angin

sehingga memberikan lebih banyak tekanan angin pada sudu yang bergerak maju. Karena hal ini, torsi statis rotor meningkat secara signifikan.

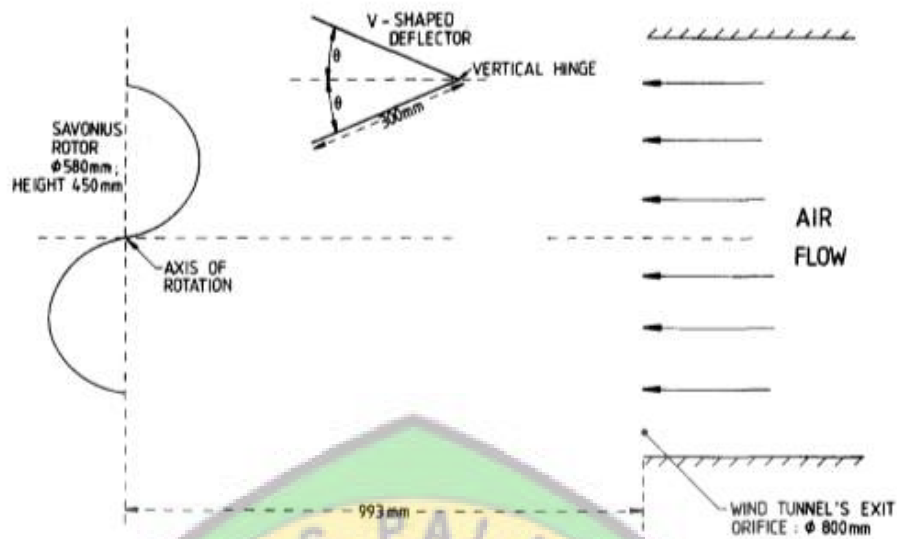


(Sumber: Reupke dan Probert, 1991)

Gambar 2.16 *Slatted blade*

4. *V-Shaped Deflectors*

Dalam prakteknya, *V-Shaped Deflectors* ditempatkan di depan rotor Savonius, sehingga hambatan aliran angin bertemu dengan *returning blade* rotor. Serangkaian percobaan terowongan angin telah dilakukan dengan memvariasikan *semi-angle* deflektor antara 5 dan 45 derajat. Dengan deflektor yang cenderung optimal, rotor mengekstraksi sekitar 20% lebih banyak daya daripada rotor Savonius konvensional. (Shaughnessy dan Probert, 1992)

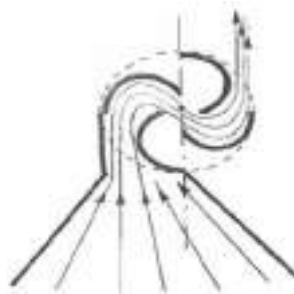


(Sumber: Shaughnessy dan Probert, 1992)

Gambar 2.17 diagram skematis pengujian *V-Shaped Deflectors*

5. *Nozzles*

Penerapan *nozzle* adalah inovasi untuk memperbesar kecepatan angin sebelum bertemu dengan sudu rotor Savonius. Ketika *nozzle* digunakan, torsi negatif rotor berkurang, dan kecepatan angin bertambah. Jadi, *nozzle* dapat meningkatkan kecepatan angin 2 hingga 3 kali. (Shikha, Bhatti, dan Kothari, 2003)



(Sumber: Shikha, Bhatti, dan Kothari, 2003)

Gambar 2.18 Savonius empat sudu dengan *Nozzle*

6. *Multistaging*.

Rotor Savonius konvensional terutama memiliki dua kelemahan pada karakteristik torsi. Pertama, ia memiliki fluktuasi besar torsi pada beberapa putaran awal turbin, dan kedua, ia memiliki beberapa posisi sudut di mana torsi menjadi negatif atau bahkan sangat kecil sehingga mengurangi kinerja rotor. Ketika *staging* rotor ditingkatkan dari 1 menjadi 2, C_P menjadi lebih tinggi; tetapi ketika jumlah *staging* ditingkatkan dari 2 menjadi 3, C_P berkurang karena inersia rotor yang meningkat. (Menet, 2004).



(Sumber: Menet, 2004)

Gambar 2.19 Prototipe dari *Multistaging*.

7. *Twisted Blade*

Kamoji, Kedare, dan Prabhu (2009) meneliti bahwa rotor *Twisted Blade* dengan sudut putaran 90 derajat dalam terowongan angin kecepatan rendah menunjukkan potensi yang lebih tinggi dari *semicircular blade* dalam hal kelancaran, dan juga memiliki C_p lebih tinggi.

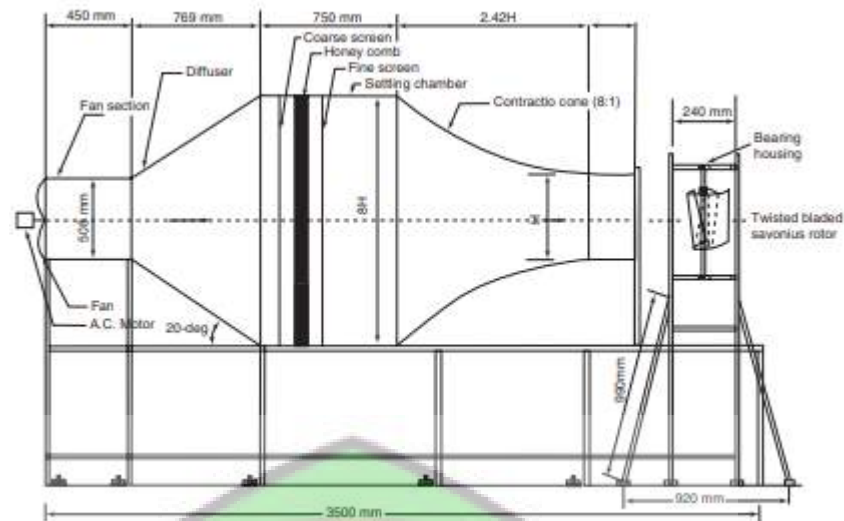


(Sumber: Kamoji, Kedare, dan Prabhu 2009)

Gambar 2.20 *Twisted Blade*.

8. *Valves*

Mekanismenya terbukti cocok untuk mesin besar. Ketika bilah bergerak ke arah angin, *valve* terbuka secara otomatis karena tekanan angin dan karenanya mengalami hambatan aliran yang lebih rendah. *Valve* akan ditutup secara otomatis oleh gaya sentrifugal. *Valve* terbukti dapat mengurangi torsi negatif dari pada rotor Savonius konvensional (Rajkumar dan Saha, 2006).

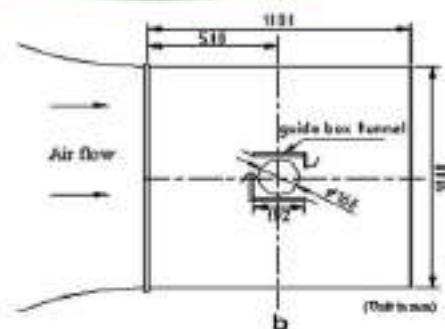


(Sumber: Rajkumar dan Saha, 2006).

Gambar 2.21 Skema pengujian *Valve* dengan menggunakan terowongan angin.

9. *Guide Box Tunnel*

Irabu dan Roy (2007) menggunakan *guide box tunnel* untuk meningkatkan daya *output* dan untuk mencegah rotor dari angin yang berputar. Hasilnya *guide box tunnel* Menambah C_p sebanyak 1,5 kali untuk bilah tiga bilah dan 1,23 kali untuk bilah dua bilah.

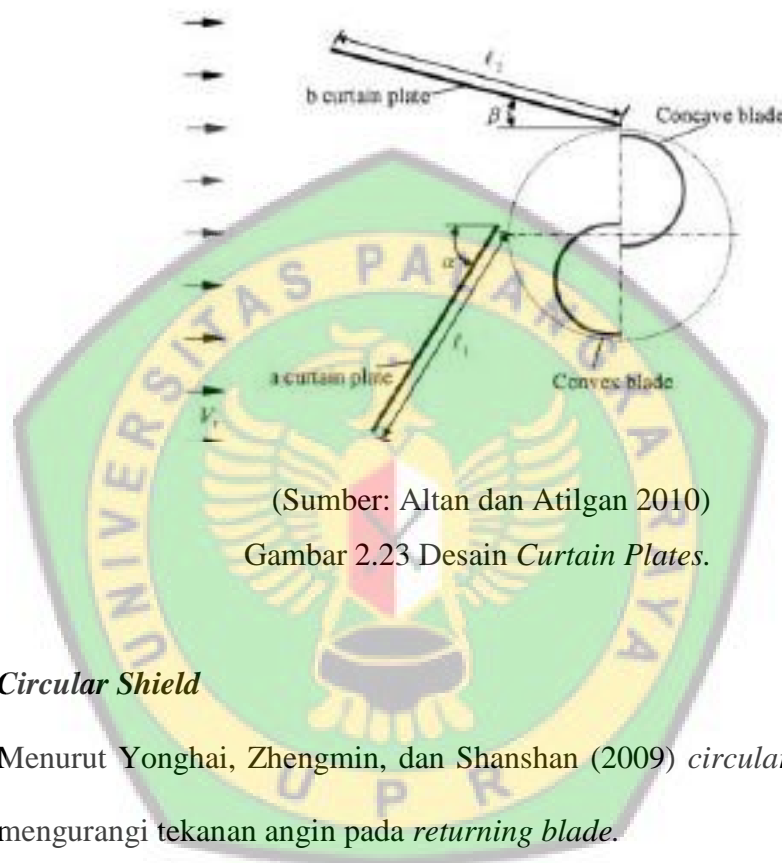


(Sumber: Irabu dan Roy, 2007)

Gambar 2.22 Tampak atas skema uji coba *guide box tunnel*.

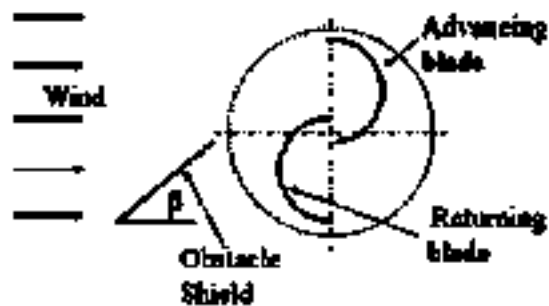
10. *Curtain Plates*

Altan dan Atilgan (2010) membuktikan bahwa adanya peningkatan kinerja sebesar 16% dengan menggunakan *Curtain Plates* dibandingkan dengan rotor yang tidak menggunakan *Curtain Plates*.



11. *Circular Shield*

Menurut Yonghai, Zhengmin, dan Shanshan (2009) *circular shield* dapat mengurangi tekanan angin pada *returning blade*.



(Sumber: Alom dan Saha, 2018)

Gambar 2.24 *Circular Shield*

12. *Venting Slots*

Penggunaan *Venting slots* lebih efektif dan lebih sederhana dalam hal desain dibandingkan dengan desain *valve* yang digunakan oleh peneliti terdahulu (Abraham, 2012). Rotor telah diuji tanpa dan dengan *venting slots* untuk meminimalkan gaya dorong pada *returning blade*. Hasilnya *venting slots* dapat meminimalkan torsi negatif daripada *valve*.



(Sumber: Abraham, 2012)

Gambar 2.25 *venting slots*

13. *Guide Vane*

Gagasan utama menggunakan *guide vane* di rotor Savonius adalah untuk meningkatkan kapasitas pengambilan angin dari udara yang masuk. Elaskary *et al* (2015) menggunakan *guide vane* untuk meminimalkan torsi negatif dan meningkatkan torsi positif yang diberikan dengan memandu

udara masuk secara efektif dan lancar. Studi Octauria, Nindito dan Saputra (2021) menunjukkan penggunaan pengarah aliran *guide vane* pada turbin hidrokinetik meningkatkan kinerja turbin sebesar 34,25% dibandingkan turbin hidrokinetik yang tidak menggunakan pengarah *guide vane*.



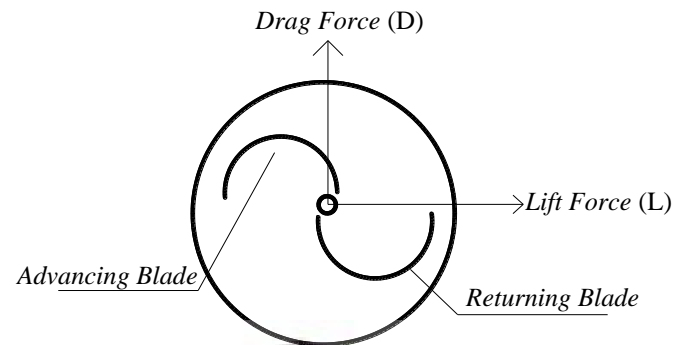
(Sumber: Octauria, Nindito dan Saputra, 2021)

Gambar 2.26 Sudut pengarah *guide vanes*

14. *Truncated Cone*

Penambahan *Truncated Cone* pada turbin *Archimedes Spiral* menyebabkan gaya tangkap aliran turbin membesar sehingga torsi yang dihasilkan meningkat. Dengan meningkatnya torsi yang dihasilkan turbin *Archimedes Spiral* dengan pengarah aliran (*Truncated Cone*) membuat konsep gaya *drag* yang dihasilkan lebih tinggi dari konsep gaya *lift* (Pratama, Nindito dan Saputra, 2021).

2.4 Bagian-Bagian Rotor Savonius



(Sumber: Alom dan Saha, 2018).

Gambar 2.27 Bagian-bagian rotor Savonius

a. *Advancing blade*

Advancing blade adalah sudu yang berbentuk cekung.

b. *Returning blade*

Returning blade adalah sudu yang berbentuk cembung.

c. *End plate*

End plate atau pelat tumpuan ini berfungsi sebagai tempat meletakkan sudu.

Penggunaan pelat batas sudu di atas dan bawah rotor secara signifikan meningkatkan koefisien daya sebesar 36% dibandingkan dengan tanpa pelat batas sudu (Jeon *et al*, 2015).

1.5 Saluran Prismatik (*Flume*)



Gambar 2.28 Saluran prismatik

Saluran prismatik atau *flume* merupakan saluran yang penampang melintangnya dibuat tidak berubah-ubah. Flume yang digunakan pada studi Yudistira, Nindito dan Saputra (2021) berukuran panjang 720 cm dan tinggi 60 cm.

1.6 Kinerja Turbin Savonius

2.6.1 Parameter *Performance*

Kinerja rotor Savonius diperkirakan dari koefisien kekuatan dan koefisien torsi. *Coefficient of Power* (C_p) turbin Savonius yang didefinisikan sebagai perbandingan antara tenaga yang dihasilkan oleh turbin dan tenaga yang berada pada aliran. Koefisien torsi (C_τ) didefinisikan sebagai rasio torsi yang dihasilkan turbin.

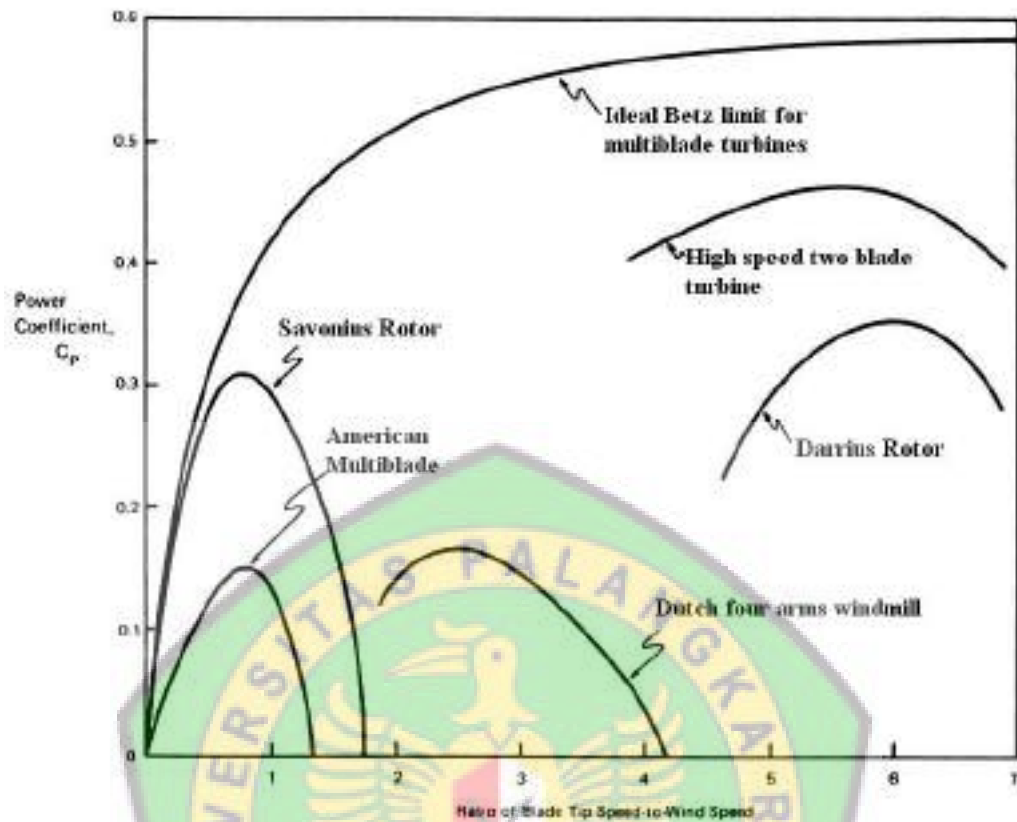
2.6.2 Parameter *Drag and Lift*

Parameter *Drag* didefinisikan sebagai kekuatan sejajar dengan arah dari aliran yang masuk, sedangkan gaya angkat didefinisikan sebagai kekuatan yang tegak lurus terhadap arah dari aliran dan merupakan konsekuensi dari perbedaan tekanan yang berbeda antara permukaan *blade* bagian atas dan *blade* bagian bawah.

Berdasarkan desain *blade* turbin yang diklasifikasikan ke dalam perangkat gaya *drag* adalah Savonius, sedangkan Turbin Darriueus, H-Darrieus dan Gorlov diklasifikasikan ke dalam gaya *lift*. Dalam turbin gaya *lift*, perbedaan tekanan antara permukaan *blade* menciptakan angkat aerodinamis yang menyebabkan turbin berputar. Dibandingkan dengan turbin berbasis gaya *lift* telah terbukti lebih baik dari sektor kemampuan berputar pada kecepatan aliran yang lebih rendah (Federal Aviation Administration, 2016).

2.6.3 *Betz Limit*

Betz Limit adalah Efisiensi maksimum turbin angin/air konvensional. Berikut merupakan gambar parameter *betz limit*.



(Sumber: Ragheb dan Ragheb, 2012)

Gambar 2.29 Parameter Betz Limit

Pada Gambar 2.29 diketahui bahwa nilai C_p maksimum rotor konvensional adalah 0,6 dan TSR maksimum turbin rotor Savonius adalah 1,8.

2.7 Parameter Kinerja Turbin

2.7.1 RPM

RPM (*Rotation Per Minute*), yaitu jumlah putaran yang terjadi dalam satu menit. Pengukuran RPM menggunakan alat ukur *Tachometer*.

2.7.2 TSR (λ)

Tip Speed Ratio (TSR) adalah rasio kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan aliran air. *Tip speed ratio* akan berpengaruh pada kecepatan putar rotor. Turbin tipe *lift* akan memiliki *tip speed ratio* yang relatif lebih besar dibandingkan dengan turbin aliran tipe *drag* (Purnama, Hantoro, dan Nugroho, 2013).

Tip speed ratio dihitung dengan persamaan:

$$\lambda = \frac{\omega D}{2 v} \quad (2.1)$$

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60 \text{ detik}} \quad (2.2)$$

di mana:

D : Diameter rotor (m),

V : Kecepatan aliran air (m/detik),

n : Putaran rotor (rpm),

ω : Kecepatan sudut (rad/detik),

λ : *Tip Speed Ratio*.

2.7.3 Torsi (τ)

Torsi adalah gaya putar yang dihasilkan oleh poros turbin atau kemampuan turbin untuk melakukan kerja. Torsi biasanya diberi simbol τ . Pengukuran torsi menggunakan torsimeter statik. Satuan untuk torsi adalah *Pounds-foot* (lbf.ft) atau *Kilogram force-meter* (Kgf.m), dalam satuan British adalah ft.lb sedangkan SI yaitu N.m.

2.7.4 Koefisien Torsi ($C\tau$)

$$(C\tau) = \frac{4\tau}{\rho v^2 D^2 H} \quad (2.3)$$

di mana:

τ : Torsi (N.m),

ρ : Densitas air (kg/m^3),

H : Tinggi rotor (m).

2.7.5 Coefficient of Power (C_P)

Koefisien daya akan dihitung dengan menggunakan teori strip untuk rasio kecepatan rotor tertentu. Ini memberikan koefisien daya rotor untuk kecepatan aliran air yang berbeda pada kecepatan rotor tetap atau untuk kecepatan rotor yang berbeda pada satu kecepatan aliran air

$$C_P = \lambda C\tau \quad (2.4)$$

di mana:

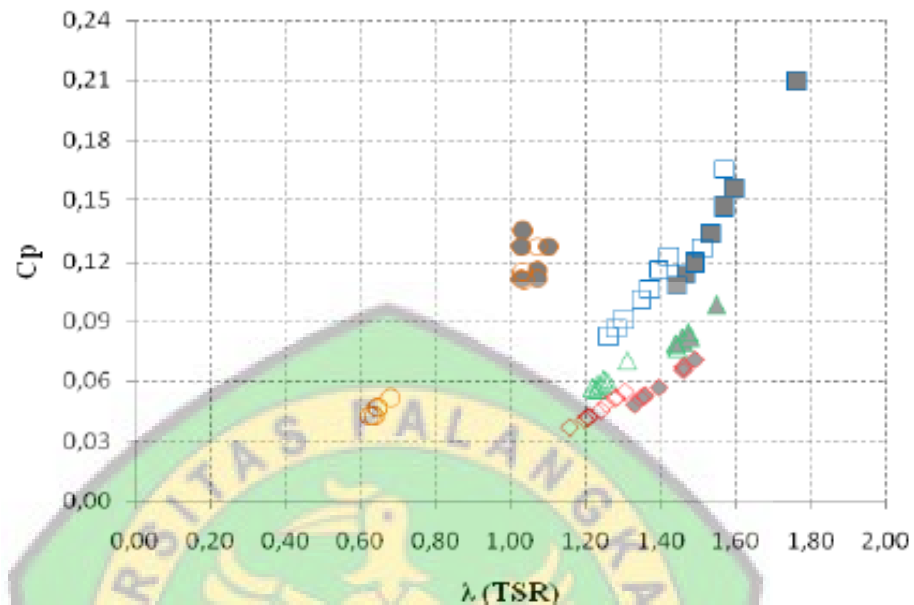
C_P : koefisien daya,

λ : *Tip Speed Ratio*,

$C\tau$: koefisien torsi.

2.8 Hubungan Antar Parameter Turbin

2.8.1 Hubungan antara TSR dan C_p

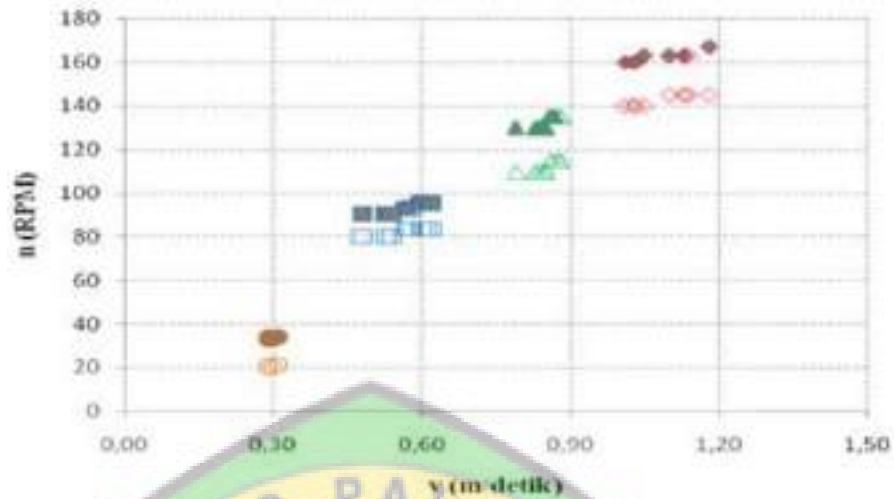


(Sumber: Purnama, Hantoro, dan Nugroho, 2013)

Gambar 2.30 Hubungan antara TSR dan C_p

Kecepatan aliran air (V_{air}) yang dapat diubah oleh turbin menjadi kecepatan putaran turbin tidak dapat melebihi kecepatannya, dikarenakan prinsip aerodinamis rotor turbin Savonius yang memanfaatkan gaya seret (*drag*) untuk mengubah energi air dari aliran air yang melalui sudu turbin, sehingga semakin cepat kecepatan aliran air, C_p (*Coefficient of Power*) turbin Savonius cenderung menurun, begitu juga dengan TSR (*Tip Speed Ratio*). Efisiensi mekanis merupakan rasio perbandingan antara daya turbin terhadap daya ideal turbin yang diberikan oleh energi aliran air (Purnama, Hantoro, dan Nugroho, 2013).

2.8.2 Hubungan antara RPM dengan variasi kecepatan aliran air.

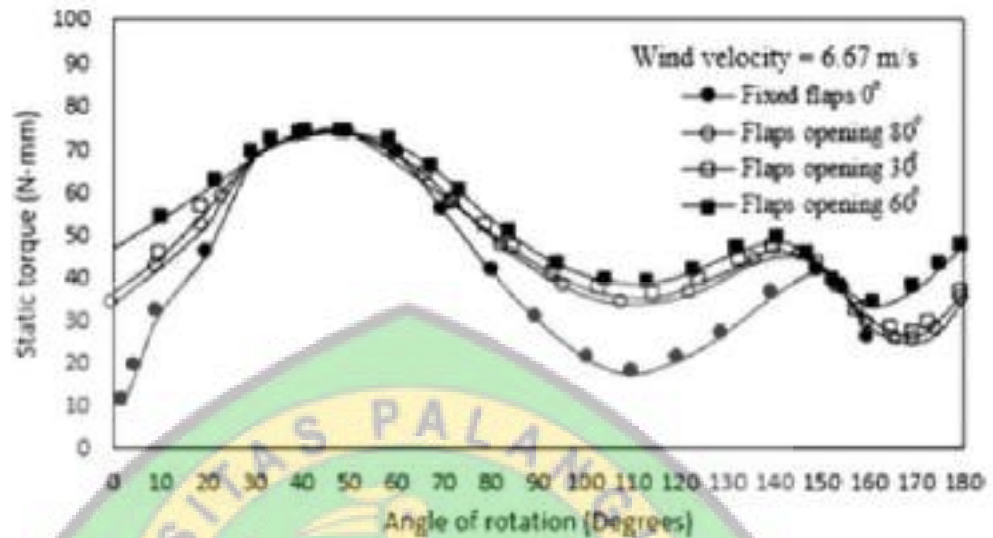


(Sumber: Purnama, Hantoro, dan Nugroho, 2013).

Gambar 2.31 Hubungan antara RPM dengan variasi kecepatan aliran air.

Menurut Purnama, Hantoro, dan Nugroho (2013) persentase putaran rotor turbin RPM meningkat rata-rata sebesar 27,28%. Nilai tersebut dipengaruhi oleh aliran air yang diarahkan langsung menuju *blade* turbin bagian cekung pada saat berputar dan pemandu arah aliran menghalangi aliran air yang menuju *blade* bagian cembung, sehingga perbandingan gaya seret/*drag* yang terjadi pada rotor bagian cekung lebih besar dari pada rotor bagian cembung, mengakibatkan rotor berputar kembali menjadi ringan.

2.8.3 Hubungan antara torsi dan sudut rotasi untuk variasi *flaps*

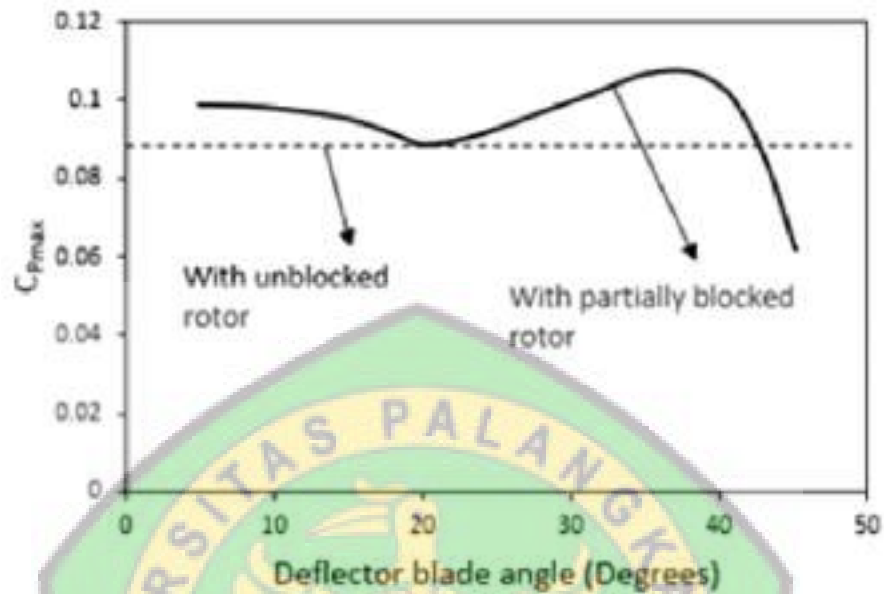


(Sumber: Tabassum dan Probert, 1987)

Gambar 2.32 Hubungan antara torsi dan sudut rotasi untuk variasi *flaps*

Studi Tabassum dan Probert (1987) hasil torsi positif didapat pada saat turbin berotasi penuh. Hal ini mengurangi amplitudo goyangan ke kiri atau ke kanan dalam torsi rata-rata yang dihasilkan selama turbin berotasi dan hal tersebut ditemukan pada turbin Savonius tipe bach variasi *flaps*.

2.8.4 Hubungan antara C_p dan variasi sudut pelat deflektor

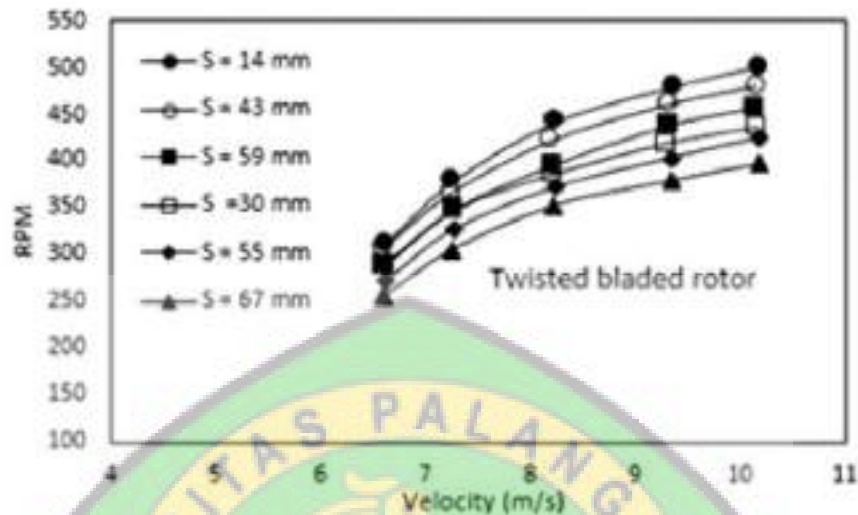


(Sumber: Alom dan Saha, 2018)

Gambar 2.33 Hubungan antara C_p dan variasi sudut pelat deflektor

Menurut Alom dan Saha (2018) serangkaian percobaan terowongan angin telah dilakukan guna memvariasikan deflektor *semi-angle* antara 5 sampai 40 derajat. Dengan deflektor yang tepat, kekuatan rotor akan lebih tinggi 20% dari pada rotor Savonius konvensional.

2.8.5 Hubungan antara RPM dan kecepatan aliran untuk variasi kecepatan rata-rata dari sudu *twisted* rotor.

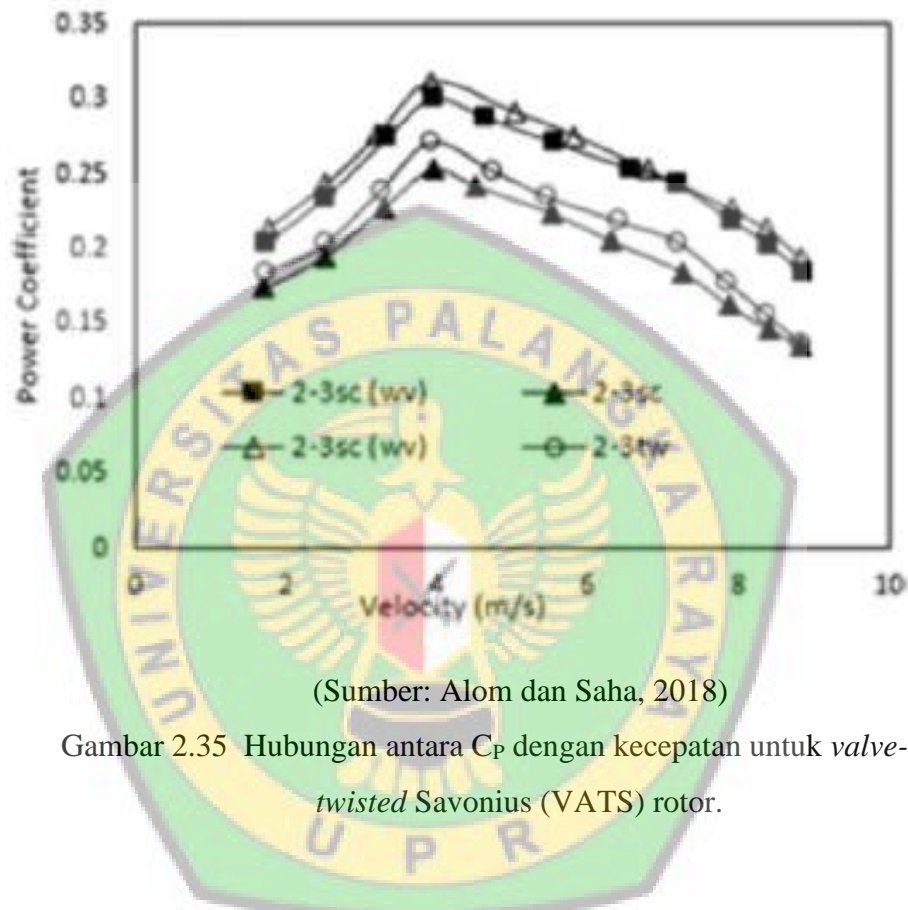


(Sumber: Alom dan Saha, 2018)

Gambar 2.34 Hubungan antara RPM dan kecepatan aliran untuk variasi kecepatan rata-rata dari sudu *twisted* rotor.

Menurut Alom dan Saha (2018) sudu rotor *Twisted* digunakan untuk mengurangi torsi negatif. Kinerja aerodinamis sudu ini telah dievaluasi berdasarkan torsi, daya *output*, dan kecepatan rotasi di berbagai sudut memutar dan lebar celah. Penyelidikan eksperimental menunjukkan potensi lebih tinggi dari *twisted* rotor dalam hal kelancaran, lebih tinggi C_p dan kemampuan awal dibandingkan dengan *semicircular-bladed* rotor.

2.8.6 Hubungan antara C_p dengan kecepatan untuk *valve-aided twisted* Savonius (VATS) rotor.



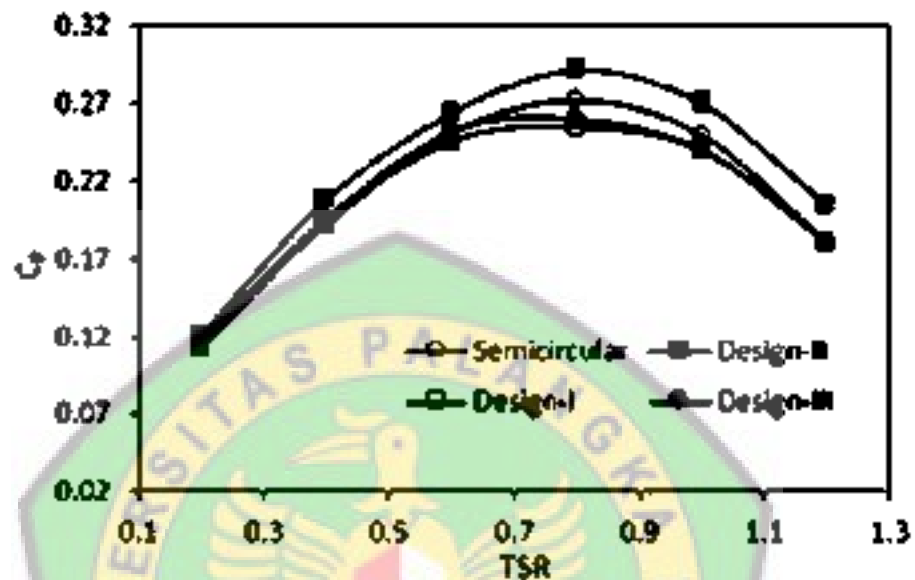
(Sumber: Alom dan Saha, 2018)

Gambar 2.35 Hubungan antara C_p dengan kecepatan untuk *valve-aided twisted* Savonius (VATS) rotor.

Valve-Aided Twisted Savonius (VATS) adalah rotor dengan katup telah diuji di terowongan angin kecepatan rendah untuk menghitung kinerjanya. Mekanisme ini ditemukan untuk menjadi independen dari arah angin, dan menunjukkan cocok untuk mesin besar. Ketika sudu menghadap ke arah angin, katup terbuka secara otomatis karena tekanan angin dan karenanya mengalami perlawanan dari aliran yang lebih rendah. Katup akan ditutup secara otomatis oleh gaya sentrifugal. Teknik ini secara signifikan meningkatkan torsi statis rotor. Rotor *Valve-Aided Twisted*

Savonius dapat meningkatkan C_p . Selain itu, kerusakan pada rotor yang sedang berputar dengan kecepatan tinggi dapat dikurangi (Alom dan Saha, 2018)

2.8.7 Hubungan variasi C_p dengan TSR untuk berbagai konfigurasi rotor.

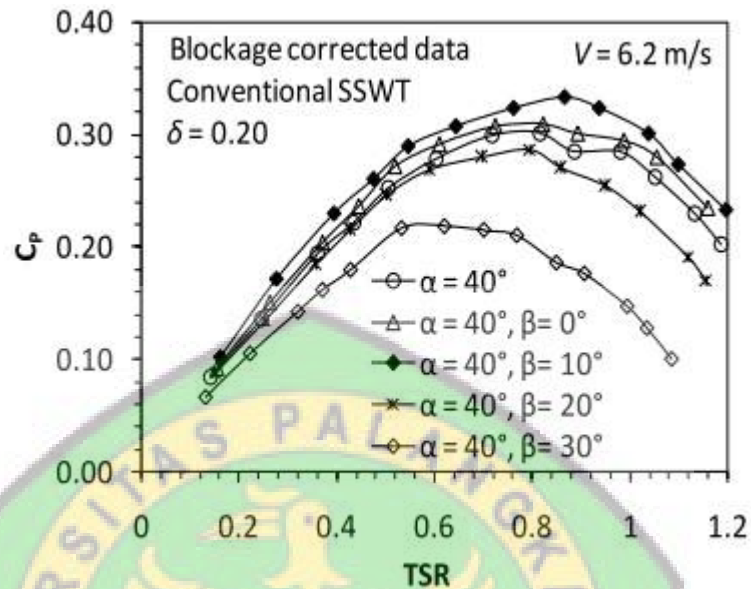


(Sumber: Alom dan Saha, 2018)

Gambar 2.36 Hubungan variasi C_p dengan TSR untuk berbagai konfigurasi rotor.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menekan tekanan yang diberikan pada bagian cembung rotor. Dalam hubungan ini, berbagai konfigurasi rotor berbilah enam telah diteliti menggunakan simulasi dua dimensi (2D) model turbulensi. Dalam studi tersebut, rotor berbilah enam tanpa *shield* ditemukan memiliki efisiensi lebih rendah namun masih lebih tinggi dari dua-berbilah Savonius rotor konvensional. Rotor enam berbilah dengan *shield* dan dengan stator telah menunjukkan maksimum C_p sekitar 0,4 dan 0,5, masing-masing, namun ini terjadi pada TSR (*Tip Speed Ratio*) berbeda (Alom dan Saha, 2018).

2.8.8 Hubungan C_p dengan TSR di berbagai orientasi dari konsentrator.

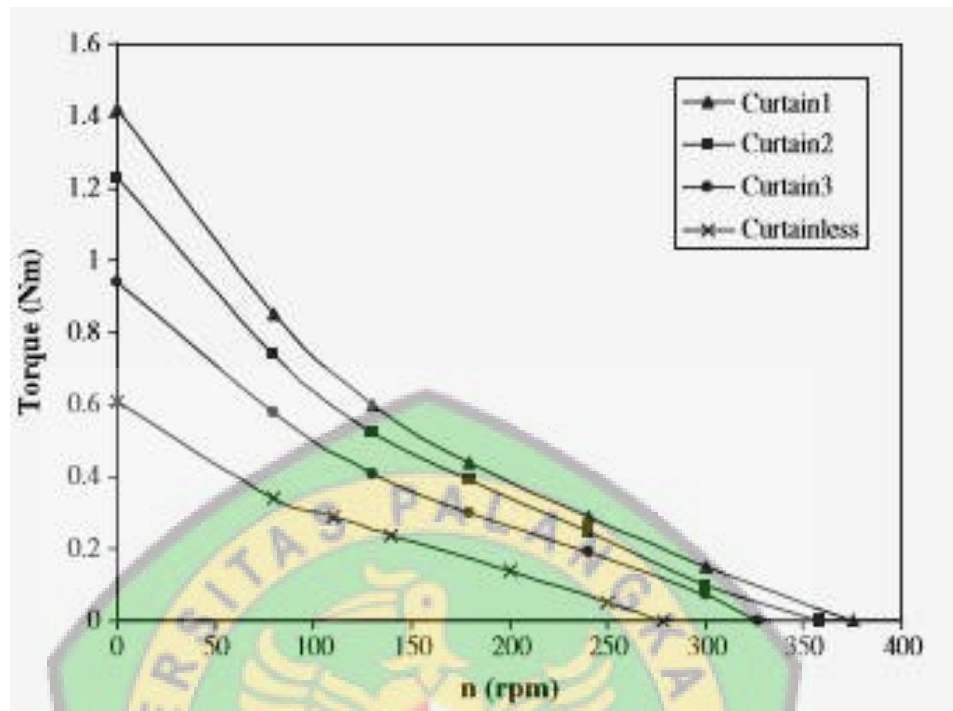


(Sumber: Roy, Mukherjee, dan Saha, 2014)

Gambar 2.37 Hubungan C_p dengan TSR di berbagai orientasi dari konsentrator.

Roy, Mukherjee, dan Saha (2014) mempelajari dan meneliti kinerja dan awal karakteristik Savonius rotor menggunakan konsentrator (pengarah). Penambahan ini digunakan sehingga bagian utama dari angin berada di sisi cekung rotor. Percobaan dilakukan di terowongan angin kecepatan rendah pada kecepatan angin 6,2 m / s, di mana beban diterapkan secara progresif sesuai kecepatan rotasi. Dengan penambahan ditempatkan pada posisi a. 40 derajat, dan b.10 derajat, rotor memperoleh puncak C_p 0,32, nilai kompetitif dengan sebuah turbin gaya *lift*. Hal ini menunjukkan peningkatan kinerja keseluruhan 47,5% dibandingkan dengan rotor berbentuk *semicircular-bladed* Savonius tanpa konsentrator (pengarah).

2.8.9 Hubungan Antara RPM Terhadap Torsi (Nm)

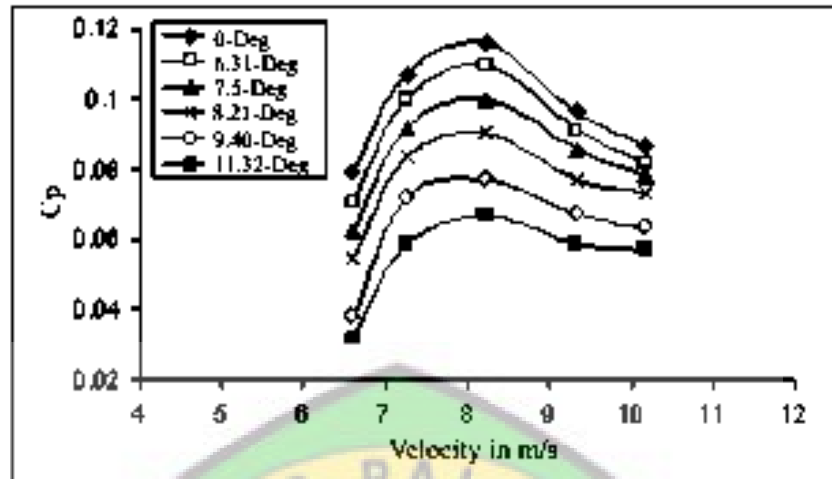


(Sumber: Altan dan Atilgan, 2010)

Gambar 2.38 Hubungan antara RPM Terhadap Torsi (Nm)

Altan dan Atilgan (2010), perubahan nilai torsi berdasarkan RPM diperoleh rotor tanpa *curtain* dan rotor dengan *curtain*. Rotor dengan *curtain* memiliki nilai torsi lebih tinggi dibandingkan dengan rotor tanpa *curtain* dengan nilai torsi sebesar 1,4 Nm.

2.8.10 Hubungan Antara Kecepatan (m/s) Terhadap C_P

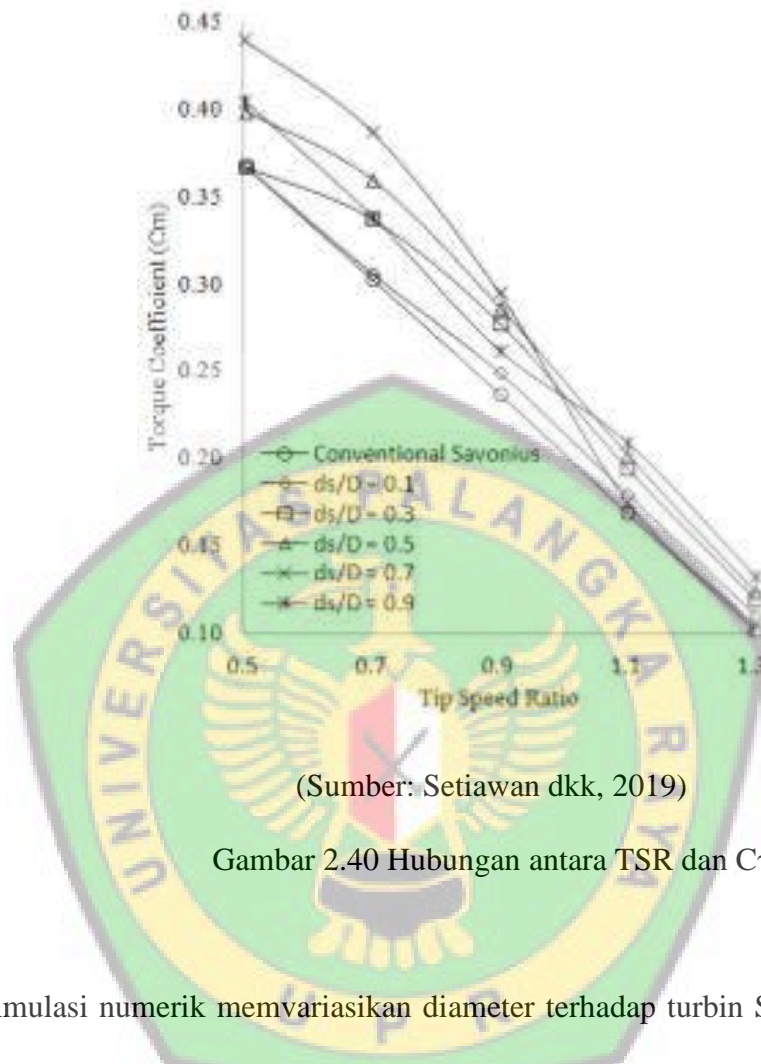


(Sumber: Grinspan, Saha, dan Mahanta 2004)

Gambar 2.39 Hubungan antara Kecepatan (m/s) Terhadap C_P

Variasi *Coefficient of Power* (C_P) *twisted bladed* rotor di dalam kisaran kecepatan udara 6,6 m/s sampai 8,22 m/s. C_P menurun dengan menurunnya kecepatan udara. (Grinspan, Saha, dan Mahanta 2004).

2.8.11 Hubungan Antara TSR dan C_t

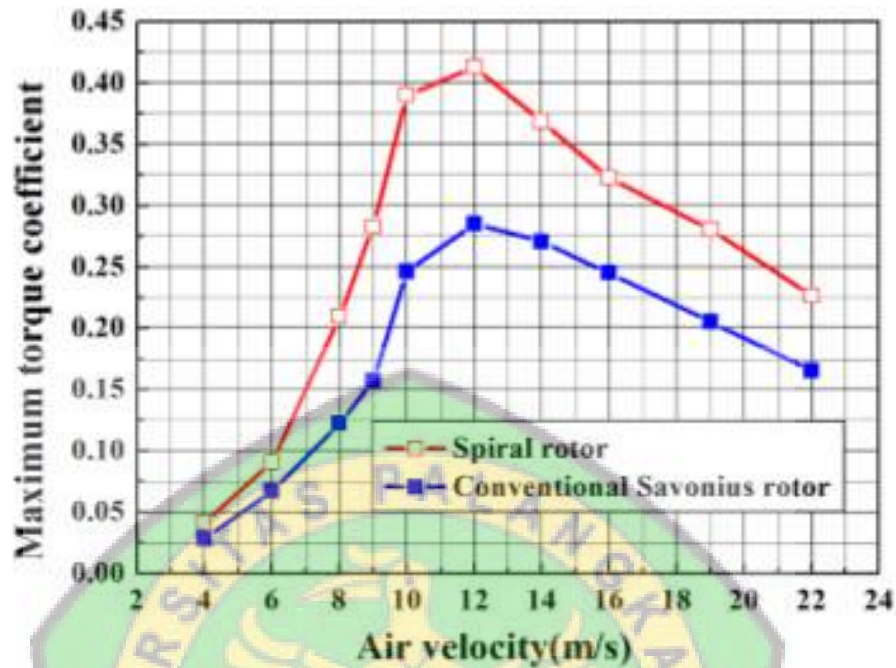


(Sumber: Setiawan dkk, 2019)

Gambar 2.40 Hubungan antara TSR dan C_t

Simulasi numerik memvariasikan diameter terhadap turbin Savonius. Hasil penelitian menunjukkan bahwa TSR turbin terhadap C_t meningkat sebesar 18,04% pada TSR 0,7. (Setiawan dkk, 2019).

2.8.12 Hubungan Antara kecepatan (m/s) dan C_T (Nm)

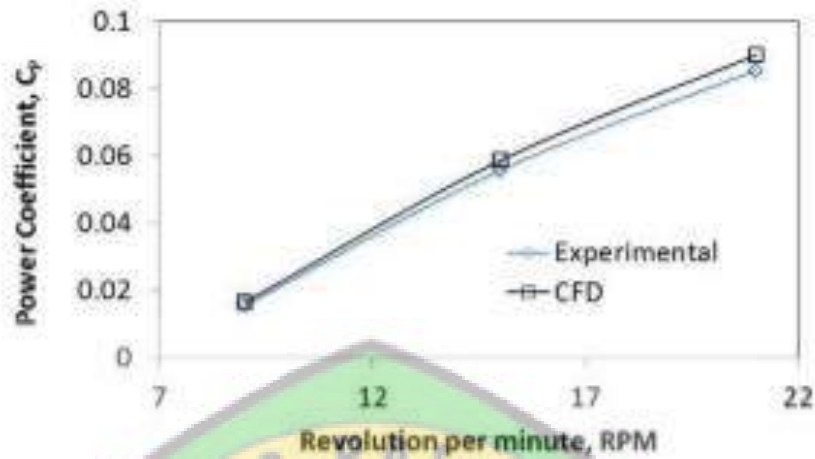


(Sumber: Setiawan dkk, 2019)

Gambar 2.41 Hubungan antara kecepatan (m/s) dan C_T (Nm)

Perubahan koefisien torsi berhubungan dengan kecepatan udara untuk kedua rotor. Koefisien torsi maksimum muncul ketika kecepatan udara mendekati nilai maksimum. Koefisien torsi maksimum rotor spiral lebih besar dari Savonius konvensional. Untuk rotor spiral, TSR optimal mendekati 0,48. Namun, kondisi operasi yang praktis pasti akan terjadi dan dapat menghasilkan penyimpangan yang menyebabkan kinerja torsi relatif buruk dan tidak stabil. (Kang, Liu, dan Yang, 2014)

2.8.13 Hubungan Antara RPM dan C_p



(Sumber: Goundar dan Prasad, 2016)

Gambar 2.42 Hubungan antara RPM dan C_p

Goundar dan Prasad (2016) membandingkan C_p yang diperoleh dari eksperimen dan kerja numerik pada RPM yang sangat rendah. C_p yang didapatkan diperkirakan lebih dari 5% menggunakan metode CFD (*Computational Fluid Dynamic*). CFD digunakan untuk memprediksi kinerja turbin.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

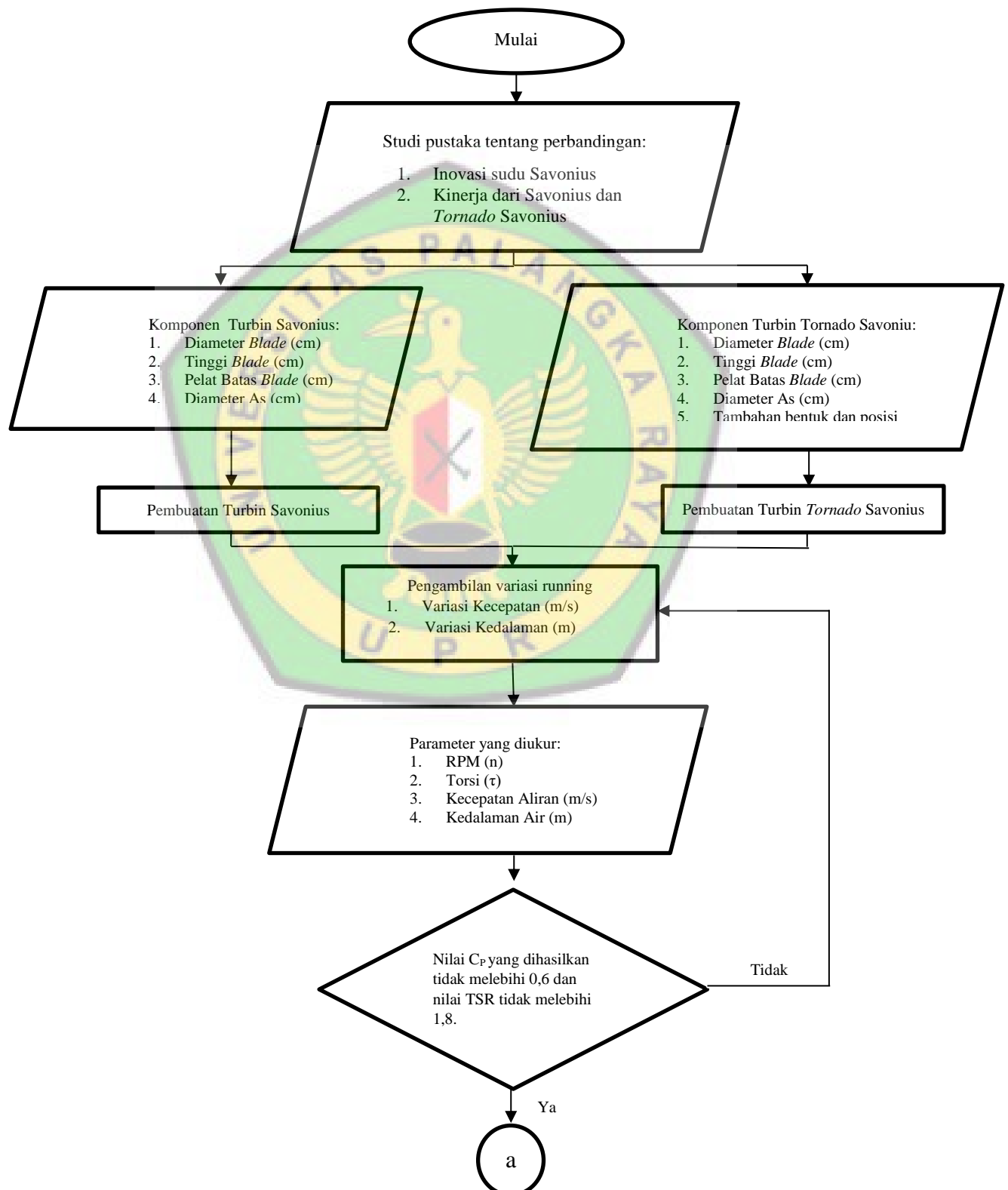
3.1 Umum

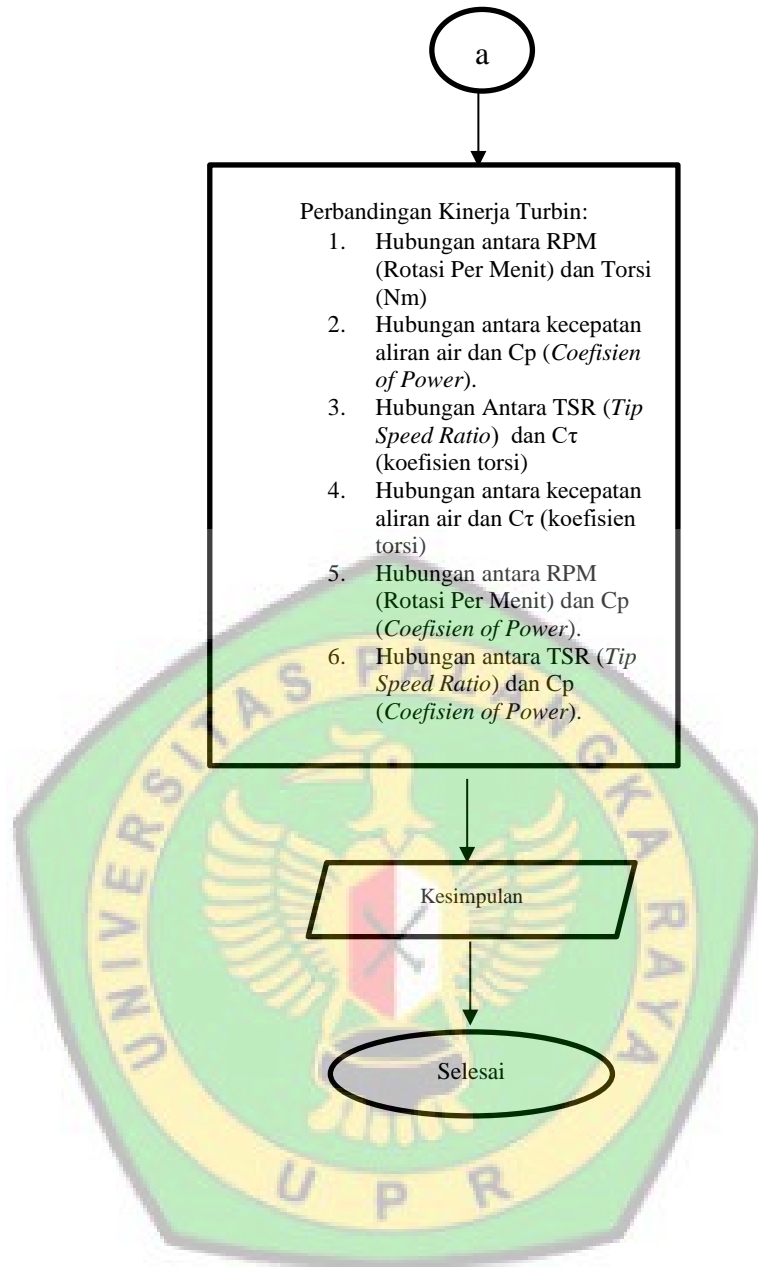
Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui kinerja antara sudu turbin Savonius yang asli dengan sudu turbin Tornado Savonius. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Hidrologi dan Hidraulika fakultas teknik Universitas Palangkaraya. Pengujian ini dilakukan untuk melihat banyaknya putaran yang dihasilkan oleh masing-masing turbin tersebut pada suatu parameter sehingga dapat diketahui turbin mana yang memiliki kinerja yang lebih baik.

Langkah-langkah penelitian ini dimulai dari studi pustaka untuk mencari acuan dalam penelitian, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan alat saluran prismatic (flume) dan turbin itu sendiri. Selanjutnya dilakukan pengujian pada flume dengan menggunakan beberapa parameter yaitu parameter kecepatan aliran dan parameter kedalaman, yang mana parameter tersebut dibuat beberapa variasi sehingga hasil parameter yang diteliti dalam penelitian ini dapat digambarkan di dalam grafik agar dapat diketahui perbedaan antara kinerja sudu turbin Savonius dengan sudu turbin Tornado Savonius.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah dalam penelitian ini di tunjukan dalam diagram alir seperti dalam Gambar 3.1:





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.3 Studi Pustaka

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi pustaka terkait materi, teori dan berbagai data dari penelitian terdahulu sebagai acuan serta pendukung pelaksanaan penelitian ini agar sesuai dengan tujuan penelitian.

3.4 Komponen Turbin

Tabel 3.1 Komponen Parameter Turbin

No	Komponen	Savonius	Tornado Savonius	Keterangan
1	Diameter Sudu	25 cm	25 cm	
2	Tinggi Sudu	38 cm	38 cm	
3	Pelat Batas Sudu	25 cm	25 cm dan 12,5 cm	
4	Diameter As	1 cm	1 cm	
5	Tambahan bentuk dan posisi Sudu			

3.5 Pembuatan Turbin

Alat yang digunakan:

1. Gerinda
2. Mesin Las
3. Bor

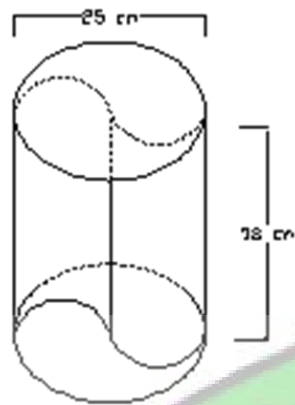
Bahan yang digunakan:

1. Pelat Besi
2. Besi as
3. Baut
4. *Bearing*
5. *Pilox*

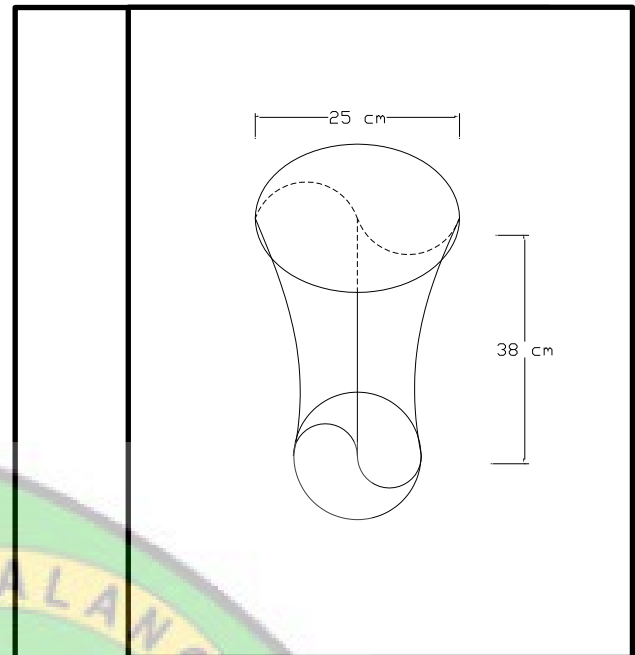
Langkah-langkah pembuatan turbin Savonius:

1. Pembuatan sudu turbin Savonius dilakukan dengan cara mengukur dan membentuk cetakan dari pelat besi sesuai bentuk turbin Savonius.
2. Potong rapi dengan menggunakan gerinda.
3. Las agar semua bagian menyatu.
4. Warnai dengan pilox
5. Kemudian, rangkai besi as, baut, dan sudu menjadi turbin Savonius.

Hasil dari langkah-langkah di atas akan seperti Gambar 3.3 dan Gambar 3.4 di bawah ini:



Gambar 3.2 Turbin Savonius

Gambar 3.3 Turbin *Tornado* Savonius

3.6 Alat-alat yang digunakan dalam pengujian

Berikut merupakan alat-alat yang digunakan dalam pengujian:

1. *Tachometer*

Tachometer adalah sebuah alat pengujian yang dirancang untuk mengukur kecepatan berputar dari sebuah objek (RPM).

2. *Current Meter*

Current meter adalah alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran air.

3. Neraca Pegas

Adalah sebuah alat pengujian yang dibuat untuk mengukur torsi dari suatu objek.

4. Kamera

Kamera di sini berfungsi sebagai alat perekam atau sebagai alat dokumentasi.

5. Saluran prismatic (*flume*)

Adalah saluran yang berbentuk penampang melintang dan kemiringan dasarnya tetap.

6. Pompa Air

berfungsi untuk menyerap sekaligus mendorong air ke dalam *flume*.

7. Turbin

Adalah sebuah mesin berputar yang mengambil energi dari aliran fluida. Dalam pengujian kali ini digunakan dua buah turbin yaitu turbin Savonius dan turbin Tornado Savonius.



Berikut merupakan gambar dari *flume* yang akan digunakan dalam pengujian:



Gambar 3.5 Saluran Prismatik (*flume*)

3.7 Pengambilan variasi *running*

Adapun variasi *running* yang dilakukan pada penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Formulir Pengambilan Variasi *Running*

No.	Kode Running	Jumlah Putaran (n)			v hitung (m/s)			V rata-rata (m/s)	h (m)	Parameter yang diukur	
		0,2 h	0,6 h	0,8 h	0,2 h	0,6 h	0,8 h			Torsi (nm)	RPM
1	S v1h1								45		
2	TS v1h1								45		
3	S v2h1								45		
4	TS v2h1								45		
5	S v3h1								45		
6	TS v3h1								45		
7	S v4h1								45		
8	TS v4h1								45		
9	S v5h1								45		
10	TS v5h1								45		
11	S v1h2								43		
12	TS v1h2								43		
13	S v2h2								43		
14	TS v2h2								43		
15	S v3h2								43		
16	TS v3h2								43		
17	S v4h2								43		
18	TS v4h2								43		
19	S v5h2								43		
20	TS v5h2								43		
21	S v1h3								40		
22	TS v1h3								40		
23	S v2h3								40		
24	TS v2h3								40		
25	S v3h3								40		
26	TS v3h3								40		
27	S v4h3								40		
28	TS v4h3								40		
29	S v5h3								40		
30	TS v5h3								40		

Lanjutan Tabel 3.2 Formulir Pengambilan Variasi *Running*

No.	Kode <i>Running</i>	Putaran terukur			v hitung (m/s)			V rata- rata (m/s)	h (m)	Parameter yang diukur	
		0,2 h	0,6 h	0,8 h	0,2 h	0,6 h	0,8 h			Torsi (Nm)	RPM (n)
31	S v1h4							32			
32	TS v1h4							32			
33	S v2h4							32			
34	TS v2h4							32			
35	S v3h4							32			
36	TS v3h4							32			
37	S v4h4							32			
38	TS v4h4							32			
39	S v5h4							32			
40	TS v5h4							32			

Keterangan tabel:

- S : Savonius
- TS : Tornado Savonius
- h : Variasi Kedalaman (m)
- v : Variasi Kecepatan (m/s)

3.8 Parameter penelitian

Penelitian dilakukan pada Laboratorium Hidraulika dan Hidrologi di Universitas Palangka Raya dengan menggunakan 4 variasi kedalaman yang diberi simbol H1, H2, H3 dan H4. Kemudian menggunakan 5 variasi kecepatan yang diberi simbol V1, V2 sampai V5, sehingga akan menghasilkan 20 data pengujian untuk satu turbin. Kode *running* S v1h1 berarti data yang diambil adalah data untuk turbin Savonius karena menggunakan turbin Savonius dengan variasi kecepatan pada kondisi 1 dan kedalaman pada kondisi 1 sedangkan kode *running* TS v1h1 berarti data yang diambil adalah data untuk turbin Tornado Savonius karena menggunakan turbin Tornado Savonius dengan variasi kecepatan pada kondisi 1 dan kedalaman pada kondisi 1, seperti pada Tabel 3.2.

Parameter yang diamati yang pertama adalah kecepatan aliran yang diukur menggunakan *current meter* pada kedalaman 0,2h, 0,6h dan 0,8h dan pengukuran dilakukan pada bagian tengah *flume*. Pengamatan kecepatan aliran yang terukur ini dilakukan pada bagian hulu turbin untuk mengetahui ada atau tidaknya perubahan distribusi kecepatan aliran pada bagian hulu turbin. Kedua yaitu kedalaman yang disimbolkan dengan h yang di mana h dapat diatur dan disesuaikan dengan menggunakan *v-notch* seperti pada Tabel 3.2. Ketiga yaitu RPM yang nilainya didapat dengan alat *tachometer*. Keempat adalah torsi yang nilainya didapat dengan menggunakan alat neraca pegas.

3.9 Parameter yang diukur

1. RPM

RPM (*Rotation Per Minute*), yaitu jumlah putaran yang terjadi dalam satu menit. Pengukuran RPM menggunakan alat ukur *Tachometer*.

2. Torsi (τ)

Torsi adalah gaya putar yang dihasilkan oleh poros turbin atau kemampuan turbin untuk melakukan kerja. Diukur dengan menggunakan neraca pegas.

3. Kecepatan Aliran (v)

Kecepatan aliran air yang dipakai pada saat pengujian. Diukur dengan menggunakan *currentmeter*.

4. Kedalaman Aliran (h)

Kedalaman aliran yang dipakai pada saat pengujian.

3.10 Perbandingan Kinerja Turbin

Perbandingan kinerja turbin ditunjukkan oleh hubungan antara beberapa parameter yang akan diukur dan dianalisis, di antaranya:

1. Hubungan antara RPM (Rotasi Per Menit) dan Torsi (Nm)
2. Hubungan antara kecepatan aliran air dan C_P (*Coefisien of Power*).
3. Hubungan antara TSR (*Tip Speed Ratio*) dan C_T (koefisien torsi)
4. Hubungan antara kecepatan aliran dan C_T (koefisien torsi)
5. Hubungan antara RPM (Rotasi Per Menit) dan C_P (*Coefisien of Power*).
6. Hubungan antara TSR (*Tip Speed Ratio*) dan C_P (*Coefisien of Power*).



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data penelitian yang dilakukan di Laboratorium Hidraulika dan Hidrologi di Universitas Palangkaraya didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain dari Tornado savonius memiliki perbedaan dengan desain dari Savonius. Perbedaan itu sendiri terletak pada bentuk *blade* turbin yaitu lebih mengecil pada bagian bawah *blade* turbin tornado Savonius dan pada *endplat* bagian bawah Tornado Savonius besarnya $\frac{1}{2}$ dari diameter *endplate* Tornado savonius bagian atas.
2. Perbandingan kinerja dari turbin Savonius dan Tornado Savonius adalah:
 - a. Luasan *blade* yang teraliri air mempengaruhi kinerja dari turbin.
 - b. Torsi yang dihasilkan oleh Turbin Tornado Savonius lebih kecil dari pada Turbin Savonius. Hal ini disebabkan oleh bentuk Tornado Savonius yang mengerucut sehingga daya tangkap turbin berkurang.
 - c. Kondisi turbin yang terendam sepenuhnya dapat mengoptimalkan kinerja turbin dibandingkan dengan kondisi turbin yang tidak terendam sepenuhnya.

- d. Diketahui pada penelitian turbin Tornado Savonius dan turbin Savonius. Pada kondisi turbin terendam sepenuhnya (kedalaman h_1 , h_2 , dan h_3), tiap kedalaman meningkat, C_t meningkat juga. Namun, pada kondisi turbin tidak terendam sepenuhnya (kedalaman h_4), karena luasan yang teraliri berkurang maka C_t yang dihasilkan oleh h_4 melebihi nilai dari h_1 , h_2 dan h_3 .
- e. Diketahui dari data penelitian turbin Savonius dan turbin Tornado Savonius. Tiap kecepatan meningkat, C_t meningkat.
- f. Diketahui dari data penelitian turbin Savonius dan turbin Tornado Savonius. Semakin cepat kecepatan aliran air semakin tinggi juga RPM yang dihasilkan turbin, semakin tinggi RPM yang dihasilkan turbin maka akan semakin tinggi C_p yang dihasilkan.

5.2 Saran

Saran yang bisa diberikan pada penelitian selanjutnya pengecilan pada bagian bawah *blade* turbin dapat diubah menjadi $\frac{1}{4}$ atau $\frac{3}{4}$ dari besar pada bagian atas *blade* turbin.

DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, A. J. dan Holownia, B. P. 1978. Wind Tunnel Tests on a Savonius Rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 3(4), pp. 343–351.
- Alom, N. dan Saha, U. K. 2018. Four Decades of Research Into The Augmentation Techniques of Savonius Wind Turbine Rotor. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 140(5), pp. 1–14.
- Altan, B. D. dan At, M. 2010. The Use of a Curtain Design to Increase The Performance Level of a Savonius Wind Rotors. *Renewable Energy*, 35, pp. 821–829.
- Antomo, T., Kamiana, I. M. dan Nindito, D. A. 2020. Analisis Pengembangan Hidrokinetik Turbin Gorlov Akibat Penambahan Luas Bidang Tangkap. *Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi*, 16(2), p. 159. [https://doi: 10.36055/tjst.v16i2.9186](https://doi.org/10.36055/tjst.v16i2.9186).
- Banerjee, A., Roy, S., Mukherjee, P., dan Saha, U. K. 2014. Unsteady Flow Analysis Around an Elliptic-Bladed Savonius-Style Wind Turbine. *ASME 2014 Gas Turbine India Conference, GTINDIA 2014*, pp. 1–7.
- Chow, V. Te. 1959. *Open-Channel Hydraulics*. Internatio. Edited by I. McGraw-Hill Book Company. New York.
- El-Askary, W. A., Nasef, M. H., AbdEL-Hamid, A. A. dan Gad, H. E. 2015. Harvesting Wind Energy for Improving Performance of Savonius Rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Elsevier, 139, pp. 8–15.
- Federal Aviation Administration 2016. *Pilot's handbook of Aeronautical Knowledge: Aerodynamics of Flight*.
- Goundar, J. N. dan Prasad, D. 2016. Design and Performance Testing of a Ducted Savonius Turbine For Marine Current Energy Extraction. *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 1–6.
- Grinspan, A. S., Saha, U. K. dan Mahanta, P. 2004. Experimental Investigation of Twisted Bladed Savonius Wind Turbine Rotor. *International Energy Journal*, 5(1), pp. 1–9.
- Hall, D. G., Reeves, K., Brizze, J., Lee, R., Carrol, G., dan Sommers, G. 2006. Feasibility Assessment of the Water Energy Resources of the United States for New Low Power and Small Hydro Classes of Hydroelectric Plants. *US Department of Energy*.

- Irabu, K. dan Roy, J. N. 2007. Characteristics of Wind Power on Savonius Rotor Using a Guide-Box Tunnel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(2), pp. 580–586.
- Jeon, K. S., Jeong, J. I., Pan, J. K., dan Ryu, K. W. 2015. Effects of End Plates With Various Shapes and Sizes on Helical Savonius Wind Turbines. *Renewable Energy*, 79(1), pp. 167–176.
- Kacprzak, K., Liskiewicz, G. dan Sobczak, K. 2013. Performance and Structure Optimization For A New Type of Vertical Axis Wind Turbine. *Renewable Energy*.
- Kamoji, M. A., Kedare, S. B. dan Prabhu, S. V. 2009. Performance Tests on Helical Savonius Rotors. *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 34, pp. 521–529.
- Kang, C., Liu, H. dan Yang, X. 2014. Review of fluid dynamics aspects of Savonius-rotor-based vertical-axis wind rotors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 33, pp. 499–508.
- Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T. dan Quaiocoe, J. E. 2009. Hydrokinetic Energy Conversion Systems and Assessment of Horizontal and Vertical Axis Turbines for River and Tidal Applications: A Technology Status Review. *Applied Energy*. Elsevier Ltd, 86(10), pp. 1823–1835.
- Menet, J. Ñ. 2004. A Double-Step Savonius Rotor For Local Production of Electricity : A Design Study 5. *Renewable Energy*, 29(11), pp. 1843–1862.
- Morcos, S. M., Khalafallah, M. G. dan Heikel, H. A. 1981. Effects of Shielding on The Aerodynamic Performance of Savonius Wind Turbines. *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. ASME, pp. 2037–2040.
- Musco, G. G. dan Molino, R. 2014. From Savonius to Bronzinus: A Comparison Among Vertical Wind Turbines. *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 50, pp. 10–18.
- Nindito, D. A., Istiarto, I. dan Kironoto, B. A. 2008. Simulasi Numeris Tiga Dimensi Kantong Lumpur Bendung Sapon. *Civil Engineering Forum Teknik Sipil*, 18(1).
- Octauria, E. P., Nindito, D. A. dan Saputra, R. H. 2021. Uji Eksperimental Pengaruh Sudut Omni Directional Guide Vanes Terhadap Performa Turbin Hidrokinetik Darrieus. *EKSERGI Jurnal Teknik Energi*, 17(2), pp. 95–108. <https://doi.org/10.32497/eksergi.v17i2.2581>.
- Ogawa, T., Yoshida, H. dan Yokota, Y. 1989. Development of Rotational Speed Control Systems For a Savonius-Type Wind Turbine. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 111(1), pp. 53–58.

- Pratama, A., Nindito, D. A. and Saputra, R. H. 2021. Studi Eksperimental Sistem Pengarah Aliran Pada Turbin Hidrokinetik Archimedes Spiral. *Jurnal Teknik*, 19(1), pp. 1–11. <https://doi.org/10.37031/jt.v19i1.145>.
- Purnama, A. C., Hantoro, R. dan Nugroho, G. 2013. Rancang Bangun Turbin Air Sungai Poros Vertikal Tipe Savonius dengan Menggunakan Pemandu Arah Aliran. *Jurnal Teknik ITS*, 2(2), pp. B278–B282.
- Ragheb, M. dan Ragheb, A. M. 2011. Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio. *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*.
- Rajkumar, M. J. dan Saha, U. K. 2006. Valve-Aided Twisted Savonius Rotor. *Wind Engineering*, 30(3), pp. 243–254.
- Reupke, P. dan Probert, S. D. 1991. Slatted-Blade Savonius Wind-Rotors. *Applied Energy*, 40(1), pp. 65–75.
- Roy, S., Mukherjee, P. dan Saha, U. K. 2014. Aerodynamic Performance Evaluation of A Novel Savonius-Style Wind Turbine Under an Oriented Jet. *ASME 2014 Gas Turbine India Conference, GTINDIA 2014*.
- Roy, S. dan Saha, U. K. 2013. Review on The Numerical Investigations Into The Design and Development of Savonius Wind Rotors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Savonius, S. J. dan Finland, H. 1931. Mechanical Engineering. *Mechanical Engineering*, 53(5), pp. 331–338.
- Setiawan, P. A., Yuwono, T., Widodo, W. A., Julianto, E. dan Santoso, M. 2019. Numerical Study of A Circular Cylinder Effect on The Vertical Axis Savonius Water Turbine Performance at The Side of The Advancing Blade With Horizontal Distance Variations. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(2), pp. 978–985.
- Sharma, S. dan Sharma, R. K. 2016. Performance Improvement of Savonius Rotor Using Multiple Quarter Blades – A CFD Investigation. *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 127, pp. 43–54.
- Sharma, S. dan Sharma, R. K. 2017. CFD Investigation to Quantify The Effect of Layered Multiple Miniature Blades on The Performance of Savonius Rotor. *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 144, pp. 275–285.
- Shaughnessy, B. M. dan Probert, S. D. 1992. Partially-Blocked Savonius Rotor. *Applied Energy*, 43(4), pp. 239–249.
- Shikha, Bhatti, T. S. dan Kothari, D. P. 2003. Wind Energy Conversion Systems as a Distributed Source of Generation. *Journal of Energy Engineering*, 129(3), pp. 69–80.

- Song, L., Yang, Z. X., Deng, R. T., dan Yang, X. G. 2013. Performance and Structure Optimization For a New Type of Vertical Axis Wind Turbine. *International Conference on Advanced Mechatronic Systems, ICAMechS*, pp. 687–692.
- Tabassum, S. A. dan Probert, S. D. 1987. Vertical-Axis Wind Turbine: A Modified Design. *Applied Energy*, 28(1), pp. 59–67.
- Wardani, C. S., Nindito, D. A. dan Jaya, A. R. 2020. Inovasi dan Desain Turbin Hidrokinetik Darrieus Berdasarkan Bentuk Distribusi Kecepatan Aliran. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 9(1), pp. 32–43. <https://doi.org/10.33084/mits.v9i1.1771>.
- Yonghai, H. U., Zhengmin, T. dan Shanshan, W. 2009. A New Type of VAWT and Blade of Optimization. *College of Power Engineering University of Shanghai for Science and Technology Shanghai 200093*.
- Yudistira, R., Nindito, D. A. dan Saputra, R. H. 2021. Kinerja Turbin Hidrokinetik Tornado Savonius. *Jurnal Teknik: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Keteknikan*, 4(2), pp. 181–186. <https://doi: 10.52868/jt.v4i2.2732>.

