

**DISERTASI**

**KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN MODIFIKASI  
BENTUK GEOMETRI SUDU TIPE BACH**

***THE PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE  
WITH MODIFICATION OF BLADE SHAPE GEOMETRY  
OF BACH TYPE***

**KHAIRIL ANWAR**



Optimization Software:  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2020**

**DISERTASI**

**KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN MODIFIKASI  
BENTUK GEOMETRI SUDU TIPE *BACH***

***THE PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE  
WITH MODIFICATION OF BLADE SHAPE GEOMETRY  
OF BACH TYPE***

**KHAIRIL ANWAR**



**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2020**



**KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN MODIFIKASI  
BENTUK GEOMETRI SUDU TIPE *BACH***

**Disertasi**

**Sebagai Salah Satu syarat untuk mencapai Gelar Doktor**

**Program Studi**

**Teknik Mesin**

**Disusun dan Diajukan oleh**

**KHAIRIL ANWAR  
P1400316002**

**Kepada**

**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2020**



DISERTASI

**KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN MODIFIKASI  
BENTUK GEOMETRI SUDU TIPE BACH**

Disusun dan diajukan oleh

**KHAIRIL ANWAR**

Nomor Pokok P1400316002

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi

pada tanggal 25 Agustus 2020

dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui,  
Komisi Penasehat,

**Prof. Dr. Ir. H. Syukri Himran, MSME.**  
Promotor

**Dr. Ir. Luther Sule, MT.**  
Ko Promotor

Ketua Program Studi  
S3 Teknik Mesin

**Dr. Ir. H. Nasruddin Aziz, M.Si.**  
Ko Promotor

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin

**Erwin Eka Putra, ST. MT.** **Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT**



## PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

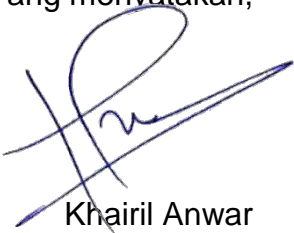
Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Khairil Anwar  
Nomor Pokok : P1400316002  
Program Studi : S3 Teknik Mesin

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi yang saya tulis ini benar – benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, September 2020

Yang menyatakan,



Khairil Anwar



## PRAKATA

Alhamdulillahirabbil'alaamiin, segala puji dan syukur senantiasa dipanjatkan kepada Allah swt, atas rahmat dan hidayahNya sehingga Disertasi ini bisa terselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam selalu tercurah kepada rasulullah Muhammad sallallahu 'alaihi wa sallam.

Gagasan yang melatarbelakangi penelitian ini, melihat adanya potensi energi angin yang cukup melimpah namun belum dimanfaatkan secara optimal, karena terkendala dengan ketersediaan peralatan konversi energi angin yang sulit diperoleh, umumnya masih mahal dengan teknologi yang cukup kompleks. Padahal sesungguhnya beberapa peralatan konversi energi angin dapat dikembangkan seperti turbin angin Savonius, dengan konstruksi yang sederhana, mudah dibuat dan biaya yang relatif murah. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pemanfaatan energi angin yang relatif sederhana, lebih murah dan efisien, yang dapat dikembangkan oleh masyarakat untuk memenuhi kebutuhan akan penyediaan energi.

Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis dalam rangka pelaksanaan penelitian dan penyusunan disertasi ini, yang hanya atas bantuan dari berbagai pihak, maka penulis dapat menyelesaikannya. Oleh karena itu Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya atas segala bimbingan, motivasi, arahan dan bantuan pemikiran yang konstruktif, fasilitas dan doa dari berbagai pihak, kepada :

- Prof. Dr. Ir. H. Syukri Himran, MSME, selaku promotor yang telah mencurahkan tenaga, pikiran, keilmuan, dan waktunya yang sangat berharga untuk memberikan bimbingan kepada penulis.
- Dr. Ir. Luther Sule, MT dan Dr. Ir. H. Nasruddin Azis, M.Si selaku Kopromotor yang telah membimbing penulis dengan penuh kesabaran, terima kasih atas segala pengetahuan, pengalaman dan dorongan moril yang diberikan.
- Prof. Dr. Ir. H. Nasaruddin Salam, MT, Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT., Dr. RUSTAN Tarakka, ST., MT., dan Dr. Eng. Novriany Amaliah, ST., MT., selaku penguji yang telah memberikan masukan dan saran yang sangat berharga untuk kesempurnaan disertasi ini.
- Prof. Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.Sc., selaku penguji eksternal yang telah berkenan memberikan untuk memberikan masukan dan saran yang sangat berharga untuk kesempurnaan disertasi ini.
- Pimpinan Universitas Hasanuddin, Pimpinan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Pimpinan Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin, Ketua Program Studi S3 Teknik Mesin Universitas Hasanuddin, Kepala Laboratorium Mekanika Fluida, serta seluruh dosen dan staf administrasi, atas segala dukungan, bantuan dan fasilitas selama studi.



- Pimpinan Universitas Tadulako, Pimpinan Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Pimpinan Jurusan Teknik Mesin Universitas Tadulako, Kepala Laboratorium Jurusan Teknik Mesin, beserta seluruh dosen, staf dan mahasiswa, atas segala bantuan, motivasi maupun dukungan moril untuk melanjutkan studi dan melaksanakan penelitian.
- Rekan – rekan seperjuangan, terutama mahasiswa Program Studi S3 Teknik Mesin Angkatan 2016: Bakri, Sri Chandrabakty, Daud Patabang, Mustofa, Setiawan, Dermawan, Viktus Kolo Koten dan Asmeaty, serta seluruh mahasiswa program studi S3 Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.
- Rekan – rekan Mahasiswa Program Studi S2 dan S1 Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian.
- Semua fihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat disebut satu persatu.
- Dan terkhusus kepada istri tercinta Andriany Firdaus, SP, kedua orang tua Nurdin Siddik (alm) dan Hj. Sitti Asmah ahmad (alm), Mertua Drs. H. Firdaus Achmad dan Hj. Nurhaedah, Saudara-saudara (Nuraeni Nurdin (alm), Dra. Ida Kurniati Nurdin, Andriani Nurdin dan Taufiq Nurdin), Saudara ipar (Drs. Alimin, Irawan Eko Cahyono SH, Noormalasari Eka Putri, Wirman Firdaus, Armansyah Firdaus, Fakhry Ramdhany dan Fatmy Rahma Utary) serta ponakan-ponakan: Dian Kusumawati, Ahmad Alimin, Shafwan Alimin, Sabrina, Aprilia, Akram, Aidam, Angga, Arly, Kinar dan Dee, yang telah memberikan semangat serta dukungan moral, dan dengan penuh kesabaran senantiasa mendoakan untuk penyelesaian studi ini.

Semoga Allah, swt membalas kebaikan kepada semua fihak yang telah membantu dan memberikan dukungan dalam penyelesaian studi ini. Penulis menyampaikan permohonan maaf sekiranya dalam proses berinteraksi dengan pihak-pihak terkait terjadi hal-hal yang tidak berkenan di hati. Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih terdapat kekurangan dan kekeliruan yang luput dari pengamatan. Oleh karena itu, kritik dan saran sangat dibutuhkan untuk kesempurnaan disertasi ini. Semoga disertasi ini bermanfaat bagi masyarakat dan pengembangan ilmu pengetahuan.

Makassar, Agustus 2020

Khairil Anwar





## ABSTRAK

KHAIRIL ANWAR. Kinerja Turbin Angin Savonius Dengan Modifikasi Bentuk Geometri Sudu Tipe *Bach* (dibimbing oleh Syukri Himran, Luther Sule, Nasruddin Aziz)

Turbin angin Savonius merupakan turbin sumbu vertikal berbasis *drag* dan digunakan sebagai sumber alternatif dalam pembangkit energi skala kecil. Kesederhanaan konstruksi, biaya rendah, kemampuan mulai yang baik, kecepatan operasi yang relatif rendah dan tidak tergantung pada arah angin adalah keunggulan utama rotor ini. Namun, efisiensinya lebih rendah daripada turbin angin tipe lainnya karena torsi negatif yang tinggi yang dihasilkan oleh sudu kembali. Tujuan penelitian ini adalah mengkaji modifikasi bentuk geometri sudu turbin angin Savonius tipe *Bach* untuk mendapatkan kinerja yang optimal. Modifikasi dilakukan pada bagian sudu lurus, dengan menekuk pada pertemuan sudu lengkung dan sudu lurus, ke arah dalam ke arah luar, sehingga membentuk sudut tertentu. Terdapat 5 model rotor yang diuji termasuk model baseline (tanpa tekukan atau  $\beta=90^\circ$ ), dua model ditekuk ke dalam ( $\beta=70^\circ$  and  $\beta=80^\circ$ ), dan dua model ditekuk keluar ( $\beta=100^\circ$  dan  $\beta=110^\circ$ ). Kelima model sudu yang diuji memiliki jarak antar sudu yang sama. Penelitian dilakukan dengan simulasi CFD secara statis untuk mendapatkan karakteristik aerodinamis dan simulasi dinamis untuk mendapatkan kinerja rotor. Selanjutnya penelitian eksperimental dilakukan juga secara statis dan dinamis, di mana model turbin angin Savonius diuji pada terowongan angin untuk memperoleh kinerja turbin dengan parameter koefisien *drag* ( $C_D$ ), koefisien momen ( $C_M$ ) dan koefisien daya ( $C_P$ ) terhadap perubahan rasio kecepatan ujung (TSR). Untuk simulasi statis, hasil penelitian menunjukkan nilai koefisien *drag* ( $C_D$ ) yang lebih tinggi diperoleh pada modifikasi turbin dengan sudut tekuk ke arah luar ( $\beta=100^\circ$  dan  $110^\circ$ ) pada posisi rotor  $150^\circ$  dan  $330^\circ$  dibandingkan model lainnya. Sedangkan nilai koefisien *lift* ( $C_L$ ) tertinggi diperoleh pada turbin model dengan sudut tekuk  $\beta=100^\circ$  pada posisi rotor  $90^\circ$  and  $270^\circ$ . Hasil yang sama diperoleh pada pengujian eksperimental statis untuk nilai koefisien *drag*. Untuk simulasi CFD secara dinamis, hasil menunjukkan rotor dengan sudut sudu lurus  $\beta=100^\circ$  memiliki koefisien daya tertinggi pada  $TSR=0.8$ . Sedangkan rotor dengan sudut sudu lurus  $\beta=70^\circ$  memiliki koefisien daya terendah sebesar 0.172 pada  $TSR = 0.8$ . Hasil ini sesuai dengan data eksperimen, di mana rotor dengan sudut sudu lurus  $\beta=100^\circ$  memiliki koefisien daya tertinggi sebesar 0.244 pada  $TSR=0.8$ . Sedangkan, koefisien daya maksimum untuk model I ( $\beta=90^\circ$ ), model V ( $\beta=110^\circ$ ), model III ( $\beta=80^\circ$ ) dan model II ditemukan 0,241, 0,234, 0,208 dan 0,205 berturut – turut, masing-masing pada  $TSR=0,8$ .

**Kata Kunci** : Energi Angin, Turbin Savonius, *Bach* Type, Sudut sudu, koefisien Momen, koefisien Daya





## ABSTRACT

KHAIRIL ANWAR. *The Performance of Savonius Wind Turbine with Modification of Blade Shape Geometry of Bach Type* (Supervised by Syukri Himran, Luther Sule, Nasruddin Aziz)

The Savonius wind turbines are drag-based vertical axis turbines and used as an alternative source in small-scale energy generation. Construction simplicity, low-cost, good starting capability, relatively low operating speed, and independent of wind direction are the main advantages of this rotor. However, its efficiency is lower than other types of wind turbines due to the high negative torque produced by the returning blade. The purpose of this study is to examine the modification of the geometric shape of the Savonius Bach-type wind turbine blade to get optimal performance. Modifications are made on the straight blade, by bending the blade at the connection of the curved blade and the straight blade, inward and outward to form a certain angle. There are five rotor models tested including the baseline model (without bending or  $\beta=90^\circ$ ), two models are bent inward ( $\beta=70^\circ$  and  $\beta=80^\circ$ ), and two models are bent outward ( $\beta=100^\circ$  and  $\beta=110^\circ$ ). This study was conducted with static CFD simulations to get aerodynamic characteristics and dynamic simulations to get rotor performance. Furthermore, experimental research is also carried out statically and dynamically, where Savonius wind turbine models are tested in the wind tunnel to obtain turbine performance with parameters of the drag coefficient ( $C_D$ ), moment coefficient ( $C_M$ ) and power coefficient ( $C_P$ ) on change in tip speed ratio (TSR). For static simulations, the results show the drag coefficient ( $C_D$ ) in the modification of the turbine with outward bending angles ( $\beta=100^\circ$  and  $110^\circ$ ) at the rotor positions  $150^\circ$  and  $330^\circ$  is higher than other models. Meanwhile, the highest lift coefficient ( $C_L$ ) is obtained in the turbine model with bend angle  $\beta=100^\circ$  at the rotor position  $90^\circ$  and  $270^\circ$ . The same results were obtained in experimental tests for the drag coefficient. For dynamic CFD simulations, the results show the rotor with a straight blade angle  $\beta=100^\circ$  has the highest power coefficient at  $TSR=0.8$ . While the rotor with a straight blade angle,  $\beta=70^\circ$ , has the lowest power coefficient at  $TSR=0.8$ . This result is in accordance with experimental data, where the rotor with a straight blade angle  $\beta=100^\circ$  has the highest power coefficient of 0.244 at  $TSR=0.8$ . Meanwhile, the maximum power coefficient for model I ( $\beta=90^\circ$ ), model V ( $\beta=110^\circ$ ), model III ( $\beta=80^\circ$ ) and model II ( $\beta=70^\circ$ ) is found of 0.241, 0.234, 0.208 and 0.205, respectively, at  $TSR = 0.8$ .

**Keywords:** Wind Energy, Turbine Savonius, Bach Type, Straight Blade, Moment Coefficient, Power Coefficient.



## DAFTAR ISI

PENGESAHAN UJIAN PROMOSI.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI .....	iv
PRAKATA .....	v
ABSTRAK .....	vii
<i>ABSTRACT</i> .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xvi
DAFTAR SIMBOL.....	xvii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Hipotesis .....	12
C. Rumusan Masalah.....	13
D. Tujuan Penelitian.....	14
E. Batasan Masalah .....	15
F. Keterbaruan Penelitian.....	15
G. Manfaat / Kegunaan Penelitian.....	16
H. Ruang Lingkup Penelitian .....	17
H. Sistematika Penelitian.....	18
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	21
A. Persamaan Dasar Aliran Fluida .....	21
1. Kekekalan Massa .....	21
2. Kekekalan Momentum .....	22
3. Persamaan Energi – Hukum Pertama Termodinamika.....	23
B. Ketersediaan Daya Angin .....	26
C. Rotor Kincir Angin.....	29
D. Turbin Angin Savonius.....	30
E. Parameter Dasar .....	35
Parameter Yang Mempengaruhi Kinerja Rotor Savonius.....	42
Bentuk / Model Sudu.....	43
Parameter Desain .....	45
Jumlah Sudu.....	47



4. Jumlah Tingkat .....	48
5. Penambahan komponen pengarah.....	49
G. Sudu Tipe <i>Bach</i> .....	51
H. Simulasi Numerik CFD.....	58
BAB III METODE PENELITIAN.....	61
A. Rancangan Penelitian.....	61
B. Model Sudu.....	64
C. Waktu dan Tempat Penelitian.....	66
D. Metode Simulasi CFD .....	66
1. Simulasi Statis .....	66
2. Simulasi Dinamis .....	73
E. Diagram Alir Proses Simulasi .....	78
F. Metode Eksperimental .....	79
1. Pengujian Kinerja Dinamis.....	80
2. Pengujian Kinerja Statis.....	87
3. Pengujian Visualisasi Aliran.....	89
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	90
A. Pengujian Kinerja Statis.....	91
1. Koefisien <i>Drag</i> ( $C_D$ ).....	92
2. Koefisien <i>Lift</i> ( $C_L$ ).....	100
3. Vektor kecepatan dan kontur tekanan .....	105
4. Visualisasi aliran .....	112
B. Pengujian Kinerja Dinamis.....	118
1. Validasi Simulasi CFD .....	119
2. Koefisien Momen ( $C_M$ ) .....	121
3. Koefisien Daya ( $C_P$ ) .....	126
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	139
A. Kesimpulan .....	139
B. Saran .....	140
DAFTAR PUSTAKA.....	141

LAMPIRAN



## DAFTAR GAMBAR

Nomor		halaman
1.	Kapasitas terpasang energi angin dunia sampai tahun 2018	1
2.	Volume udara/detik, $A_v$ yang mengalir tiap detik melalui penampang $A$ , menyatakan laju aliran massa udara $\rho A v$ (kg/s) (Himran, 2005)	26
3.	Perbedaan aliran udara dan tekanan yang disebabkan oleh Wing-Rotor dengan sudu tertutup di tengahnya. Terdapat kekosongan di bagian belakang sudu a	31
4.	Perbedaan aliran udara dan tekanan yang disebabkan oleh rotor dengan bukaan di antara sudu. Terdapat aliran yang halus dan tidak adanya ruang vakum di bagian belakang sudu a	31
5.	Skema sebuah rotor Savonius: (a) representasi 2D (b) representasi 3D; (c) pola aliran pada rotor Skema sebuah rotor Savonius: (a) representasi 2D (b) representasi 3D; (c) pola aliran pada rotor (Akwa, Vielmo, dan Petry 2012)	33
6.	Pola aliran pada rotor Savonius	34
7.	Gaya <i>drag</i> dan gaya <i>lift</i> pada turbin angin Savonius konvensional	35
8.	Daya yang dihasilkan rotor sebagai fungsi putaran pada kecepatan angin tertentu	37
9.	Torsi dihasilkan rotor sebagai fungsi putaran pada kecepatan angin tertentu	38
10.	Daya dan torsi sebagai fungsi putaran pada berbagai kecepatan angin	38
11.	Kurva daya torsi tak berdimensi sebagai fungsi rasio kecepatan ujung ( <i>tip speed ratio</i> )	40
12.	$C_p$ sebagai fungsi dari $\lambda$ berbagai tipe rotor (Manwell, McGowan, dan Rogers 2009)	42
13.	Bentuk Savonius rotor (a) <i>Elliptical</i> type dan (b) <i>Bach</i> type (Kacprzak, Liskiewicz, dan Sobczak 2013)	44
14.	Model sudu helix dengan variasi sudut twist (Lee et al., 2016)	44
15.	Savonius rotor: (a) Model 3D; (b) 2D; dan (c) Variasi <i>overlap</i> (Akwa, Gilmar Alves da Silva, dan Petry 2012)	46
	metri dengan aspek ratio H/D (Kamoji, Kedare, dan Prabhu 2011)	46
	ma 2 buah bucket Savonius rotor 180° dan 3 buah bucket 150° (Kacprzak, Sheldahl, dan Feltz 1977)	47



18. Savonius tiga dan empat sudu (Wenehenubun, Saputra, dan Sutanto 2015)	48
19. Savonius rotor satu, dua, dan tiga tingkat (Saha, Thotla, dan Maity 2008).	49
20. Savonius rotor dengan penambahan Penambahan komponen: (a) <i>fin</i> , (b) <i>baffle</i> , (c) <i>obstacle</i> , (d) <i>oriented jet</i> , (e) <i>wind booster</i> , (f) <i>curtain</i>	50
21. Geometri sudu <i>Bach</i> dan parameter – parameternya dengan poros (Modi dan Fernando 1989) dan Modifikasi sudu Savonius tipe <i>Bach</i> tanpa poros (Kamoji, Kedare, dan Prabhu 2009)	51
22. Modifikasi sudu lengkung Savonius tipe <i>Bach</i> (Roy dan Saha 2015)	52
23. Plot kontur Non-dimensional vorticity ( $xD=U$ ) dari aliran melewati <i>freely-rotating Bach-type</i> turbine. Garis kontur Solid menunjukkan vorticity positif; Garis kontur putus – putus menunjukkan vorticity negative (Wang dan Yeung 2016)	53
24. Nilai CD dan CL dari 3 model sudu yang diuji pada TSR=0.6. (Alom, Borah, dan Ujwal K 2018)	54
25. Pebandingan nilai koefisien torsi ( $C_m$ ) pada berbagai posisi sudut rotor pada TSR = 0.8 (Kacprzak, Liskiewicz, dan Sobczak 2013)	55
26. Distribusi kecepatan pada performa puncak pada TSR = 0.8 : (a). Tipe <i>semicircular</i> ; (b). Tipe <i>Elliptical</i> dan (c). Tipe <i>Bach</i> (Kacprzak, Liskiewicz, dan Sobczak 2013)	55
27. Struktur Simulasi Numerik	59
28. Diagram kerangka konsep penelitian	62
29. Diagram Fishbone Penelitian	63
30. Parameter sudu Savonius tipe <i>Bach</i> model <i>baseline</i>	64
31. Model sudu dengan variasi jarak <i>overlap</i> : I) model sudu <i>baseline</i> ( $\beta = 90^\circ$ ), II). Sudu lurus ditekuk ke dalam ( $\beta = 70^\circ$ ), III). Sudu lurus ditekuk ke dalam ( $\beta = 80^\circ$ ), IV). Sudu lurus ditekuk ke luar ( $\beta = 100^\circ$ ), V). Sudu lurus ditekuk ke luar ( $\beta = 110^\circ$ )	65
32. Posisi sudut putar rotor ( $\theta$ ) ke lima model sudu yang diuji	67
33. Pembuatan domain dan kondisi batas melewati sudu turbin (Roy dan Saha 2013)	69
34. Contoh hasil meshing dengan elemen-tipe: quad/tri-pave dengan menggunakan size function	70
tentuan Specify boundary type	71
boundary conditions dan computational domain	74
sebagai rotating domain dengan 2 interface	75



38. Penerapan interface untuk rotating domain dan fixed domain	75
39. Penentuan rotational velocity untuk rotating domain	76
40. Penyatuan ke dua interface rotating dan fixed domain	77
41. Penentuan ukuran time step, jumlah time step dan maksimum iterasi per time step	77
42. Diagram Alir Proses Simulasi	78
43. Desain dan prototype ke-lima model turbin angin Savonius	81
44. Poros atas dan poros bawah	82
45. Rangka / dudukan turbin	82
46. Terowongan angin dan speed regulator inverter	83
47. Pemberat	83
48. Anemometer, <i>tachometer</i> dan <i>force gauge</i>	84
49. Instalasi pengujian kinerja dinamis	85
50. Skema Savonius Rotor yang dihubungkan dengan pengukuran torsi mekanis	86
51. Model turbin Savonius untuk pengujian kinerja statis	88
52. Terowongan angin untuk pengujian kinerja statis	88
53. Penepatan model turbin pada seksi uji	88
54. Model turbin Savonius untuk pengujian visualisasi aliran	89
55. Peralatan uji visualisasi aliran	89
56. Koefisien <i>drag</i> simulasi CFD ke-lima model turbin Savonius terhadap posisi sudut rotor	92
57. Koefisien <i>Drag</i> eksperimen ke-lima model turbin Savonius terhadap posisi sudut rotor	93
58. Nilai CD ke lima model pad posisi sudut putar rotor $\theta = 0^\circ$	94
59. Nilai CD ke lima model pad posisi sudut putar rotor $\theta = 30^\circ$	95
60. Nilai CD ke lima model pad posisi sudut putar rotor $\theta = 60^\circ$	95
61. Nilai CD ke lima model pad posisi sudut putar rotor $\theta = 90^\circ$	95
62. Nilai CD ke lima model pad posisi sudut putar rotor $\theta = 120^\circ$	96
63. Nilai CD ke lima model pad posisi sudut putar rotor $\theta = 150^\circ$	96

bandingan nilai CD hasil eksperimen dan simulasi model I ( $\beta=90^\circ$ )97

bandingan nilai CD hasil eksperimen dan simulasi model II ( $\beta=70^\circ$ )97



· 66. Perbandingan nilai CD hasil eksperimen dan simulasi model III ( $\beta=80^\circ$ )	98
· 67. Perbandingan nilai CD hasil eksperimen dan simulasi model IV ( $\beta=100^\circ$ )	98
· 68. Perbandingan nilai CD hasil eksperimen dan simulasi model V ( $\beta=110^\circ$ )	98
· 69. Koefisien <i>lift</i> pada posisi sudut rotor yang berbeda	102
· 70. Vektor kecepatan terhadap posisi sudut rotor pada model baseline (model $\beta=90^\circ$ )	105
· 71. Tekanan statik pada berbagai posisi sudut putar rotor pada model baseline (model $\beta=90^\circ$ )	107
· 72. Vektor kecepatan ke lima model turbin pada posisi sudut rotor ( $\theta$ ) : (a) $90^\circ$ dan (b) $150^\circ$	108
· 73. Kontur tekanan ke lima model turbin pada posisi sudut rotor, $\theta$ : (a) $90^\circ$ dan (b) $150^\circ$	110
· 74. Perbandingan visualisasi aliran ke lima model pada posisi sudut putar $\theta = 150^\circ$	113
· 75. Visualisasi aliran di sekitar rotor pada posisi $0^\circ$	114
· 76. Visualisasi aliran di sekitar rotor pada posisi $30^\circ$	115
· 77. Visualisasi aliran di sekitar rotor pada posisi $60^\circ$	115
· 78. Visualisasi aliran di sekitar rotor pada posisi $90^\circ$	116
· 79. Visualisasi aliran di sekitar rotor pada posisi $120^\circ$	117
· 80. Visualisasi aliran di sekitar rotor pada posisi $150^\circ$	117
· 81. Mesh model Blackwell konfigurasi 11 dan $C_M$ <i>convergence</i> simulasi model Blackwell pada TSR 1	120
· 82. Hubungan koefisien momen terhadap <i>Tip speed ratio</i> untuk validasi simulasi numerik	120
· 83. Variasi nilai koefisien momen terhadap time step	122
· 84. Koefisien Momen pada berbagai nilai TSR	122
· 85. Efek sudut sudu lurus pada torsi sehubungan dengan kecepatan rotasi	123
· 86. Koefisien Momen ( $C_M$ ) terhadap nilai <i>Tip speed ratio</i> (TSR)	124
· Perbandingan nilai CM hasil eksperimen dan simulasi model I ( $\beta=90^\circ$ )	125
· Perbandingan nilai CM hasil eksperimen dan simulasi model II ( $\beta=90^\circ$ )	125





89. Perbandingan nilai CM hasil eksperimen dan simulasi model III ( $\beta=80^\circ$ )	125
90. Perbandingan nilai CM hasil eksperimen dan simulasi model IV ( $\beta=100^\circ$ )	126
91. Perbandingan nilai CM hasil eksperimen dan simulasi model V ( $\beta=110^\circ$ )	126
92. Daya Rotor ke lima model rotor terhadap putaran RPM)	127
93. Koefisien Daya ( $C_p$ ) hasil simulasi pada berbagai nilai TSR	129
94. Koefisien Daya ( $C_p$ ) hasil eksperimen terhadap nilai <i>Tip speed ratio</i> (TSR)	130
95. Perbandingan $C_p$ eksperimen dan simulasi model I ( $\beta=90^\circ$ )	131
96. Perbandingan $C_p$ eksperimen dan simulasi model II ( $\beta=70^\circ$ )	131
97. Perbandingan $C_p$ eksperimen dan simulasi model III ( $\beta=80^\circ$ )	132
98. Perbandingan $C_p$ eksperimen dan simulasi model IV ( $\beta=100^\circ$ )	132
99. Perbandingan $C_p$ eksperimen dan simulasi model V ( $\beta=110^\circ$ )	132
100. Kinerja sudu Savonius tipe- <i>Bach</i> dengan perubahan sudut sudu lurus pada TSR 0.8	133
101. Plot vektor kecepatan ke lima model sudu pada akhir time step	134



**DAFTAR TABEL**

<b>Nomor</b>	<b>halaman</b>
1. Negara yang memanfaatkan energi angin terbesar di dunia (MW)	2
2. Daya per unit area tersedia dari angin stabil (densitas udara $1.225 \text{ kg/m}^3$ ) (Manwell, McGowan, dan Rogers 2009)	27
3. Perbandingan TSR optimal dilaporkan oleh berbagai peneliti	41
4. Fokus penelitian rotor Savonius	43
5. Rangkuman beberapa penelitian rotor tipe <i>Bach</i>	57
6. Dimensi model turbin digunakan dalam eksperimen	81



## DAFTAR SIMBOL

$a$	Jarak antar sudu (mm)
$A$	Luas Penampang Permukaan Sudu Savonius ( $m_2$ )
$\beta$	Sudut sudu lurus ( $^\circ$ )
$c, d$	Panjang chord sudu (m, mm)
$C_D$	Koefisien <i>Drag</i>
$C_L$	Koefisien <i>Lift</i>
$C_M, C_q, C_t$	Koefisien Moment / Koefisien Torsi
$C_p$	Koefisien Daya
$C_{p \max}$	Koefisien Daya Maksimum
$D, D_i$	Diameter rotor (m, mm)
$D_o$	Diameter pelat ujung / end plate (m, mm)
$\phi$	Sudut kelengkungan sudu ( $^\circ$ )
$e$	jarak <i>overlap</i> sudu (mm)
$F_D$	Gaya <i>Drag</i> (N)
$F_L$	Gaya <i>Lift</i> (N)
$g$	Percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )
$H$	Tinggi rotor (m, mm)
$\mu$	Viskositas dinamis (kg/m.s)
$M_1$	Massa beban (g)
$M_2$	Massa gauge (g)
$n$	Jumlah sudu
$N$	Putaran rotor (rpm)
$P$	Daya (W)
$\rho$	Massa jenis fluida ( $kg/m^3$ )
$R$	Jari – jari rotor (m, mm)
$Re$	Bilangan Reynolds
$r_s$	Jari – jari poros (mm)
$r_n$	Jari – jari nylon string (mm)
$S_1$	Panjang sudu lurus (mm)
$S_2$	Jari – jari sudu lengkung
$t$	Tebal sudu dan pelat ujung (mm)
$T, Q$	Torsi (N)
$TSR, \lambda$	Rasio kecepatan ujung / <i>Tip speed ratio</i>
$\nu$	Viskositasi kinematis ( $m^2/s$ )
$V, v$	Kecepatan udara bebas (m/s)
$\omega$	Kecepatan sudut (rad/s)

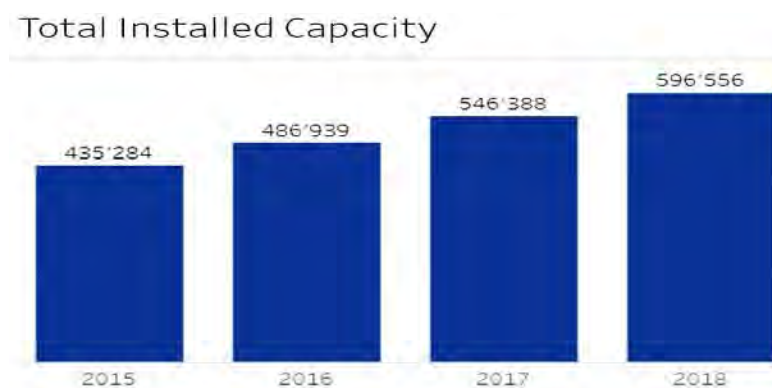


## BAB I

### PENDAHULUAN

#### A. Latar Belakang

Pemanfaatan energi terbarukan mendapat perhatian serius seiring menipisnya ketersediaan sumber energi tak terbarukan terutama dari energi fosil. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi untuk dikembangkan adalah energi angin. Di negara – negara maju, energi angin telah dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik, dan menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang cukup pesat perkembangannya, dengan potensi di masa mendatang memiliki rasio yang lebih besar sebagai pemasok kebutuhan energi dunia dibandingkan di saat ini. Sampai tahun 2018, total kapasitas energi angin terpasang di seluruh dunia telah mencapai 597 GW, bertambah 50,1 GW dari 2017. Hal ini menunjukkan tingkat pertumbuhan global 8,4% (10,9% tahun 2017) (WWEA, 2018).



Gambar 1. Kapasitas terpasang energi angin dunia sampai tahun 2018



Di antara 9 negara yang memanfaatkan energi angin terbesar, Prancis, Brazil dan Kanada adalah negara yang paling dinamis dan cepat dalam tingkat pertumbuhan pemanfaatan energi angin. Sampai tahun 2018, China masih merupakan negara pengguna energi angin terbesar, dengan kapasitas terpasang total sekitar 217 GW, bertambah sekitar 21 GW dari tahun 2017, kemudian disusul Amerika Serikat sebesar 96 GW dengan penambahan sekitar 7,5 GW dari tahun 2017 dan selanjutnya adalah Jerman dengan kapasitas terpasang total sebesar 59 GW, di mana kapasitas ini bertambah sebesar 3 GW dari tahun sebelumnya. Hal ini menunjukkan pemanfaatan energi angin di dunia saat ini berkembang dengan sangat pesat.

Tabel 1. Negara yang memanfaatkan energi angin terbesar di dunia (MW)

Country/Region1	2018	2017	2016	2015
China	216'870	195'730	168'730	148'000
United States	96'363	88'775	82'033	73'867
Germany	59'313	56'190	50'019	45'192
India**	35'017	32'879	28'279	24'759
Spain*	23'494	23'026	23'020	22'987
United Kingdom	20'743	17'852	14'512	13'614
France	15'313	13'760	12'065	10'293
Brazil**	14'490	12'763	10'800	8'715
Canada	12'816	12'239	11'898	11'205
Rest of the World*	102'138	93'173	85'582	76'653
<b>Grand Total</b>	<b>596'556</b>	<b>546'388</b>	<b>486'939</b>	<b>435'284</b>

Indonesia merupakan negara kepulauan yang 2/3 wilayahnya adalah lautan dan mempunyai garis pantai terpanjang ke-empat di dunia (setelah Kanada, dan Rusia) yaitu  $\pm 95,181$  Km serta terletak di lintasan garis khatulistiwa, dan memiliki 17,480 pulau. Dengan batas tersebut,



Indonesia memiliki potensi energi angin yang harus dikembangkan dan dimanfaatkan. Potensi energi angin di Indonesia umumnya berkecepatan lebih dari 5 m/s. Hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Lapan) pada 120 lokasi menunjukkan, beberapa wilayah memiliki kecepatan angin di atas 5 m/s, masing-masing Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa (Soeripno 2011). Mengacu pada kebijakan energi nasional, maka pembangkit listrik tenaga angin ditargetkan mencapai 250 MW pada tahun 2025 (Sugiyono dkk. 2016). PLTB Sidrap di Sulawesi Selatan yang beroperasi tahun 2018 dengan kapasitas 75 MW menjadi ladang angin pertama dan terbesar di Indonesia. Sementara itu, pembangkit tenaga angin sedang dalam momentum yang baik dengan akan adanya penambahan satu lagi ladang angin baru sebesar 72 MW di Jeneponto yang diperkirakan akan mulai beroperasi pada akhir 2018 (Adiatma dan Arinaldo 2018).

Keunggulan penggunaan energi angin antara lain secara ekologis, tidak menimbulkan dampak yang buruk terhadap lingkungan sebagaimana pada penggunaan energi fosil yang berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan dan perubahan iklim. Selain itu, sebagai sumber energi yang terbarukan, ketersediaanya dapat berkesinambungan dengan potensi yang sangat besar namun belum dimanfaatkan secara maksimal. Secara

i, pemanfaatan energi angin terutama tidak serumit jika



dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional lainnya, sehingga memungkinkan dibuat dalam skala kecil untuk kebutuhan rumah tangga.

Sedangkan kekurangan energi angin, antara lain menyangkut ketersediaan angin yang tidak merata di semua tempat. Di beberapa lokasi kecepatan angin yang tinggi membuat pemanfaatannya menjadi sangat mudah, sementara di lokasi lainnya, kecepatan angin yang cukup rendah menyulitkan untuk pemanfaatannya. Selain itu, Biaya instalasi tenaga angin yang masih relatif tinggi juga menjadi salah satu faktor energi angin belum dimanfaatkan secara maksimal.

Desain turbin angin mempunyai karakteristik spesifik, sehingga perancangannya harus disesuaikan dengan profil angin, dimana turbin akan dipasang, untuk memperoleh koefisien daya atau efisiensi yang optimal. Hal ini menjadi tantangan tersendiri dalam pengembangan energi angin, terutama daerah – daerah di Indonesia yang memiliki kecepatan angin yang relatif rendah, namun sesungguhnya memiliki potensi energi angin yang layak untuk dikembangkan.

Seperti di Kota Palu, daerah dengan topografi dataran rendah di sepanjang teluk Palu dan lembah Palu, yang terletak pada ketinggian 0 – 100 mdpl dan daerah pedalaman terletak pada ketinggian 200 – 1000 mdpl. Kondisi fisik kota Palu yang topografinya landai dengan kemiringan  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$ , sedang pegunungan yang membentang mulai dari barat

tinggi bagian selatan hingga ke timur, dengan kemiringan tanah cukup curam yaitu  $30^{\circ}$  -  $45^{\circ}$ . Dengan kondisi ini, Palu memiliki





potensi energi angin yang hampir tersedia sepanjang hari dengan kecepatan berkisar antara 3 m/s sampai 9.5 m/s (Sam dan Patabang 2013). Dengan kondisi ini, pengembangan energi angin skala kecil di kota palu cukup potensial untuk dikembangkan, namun sampai saat ini belum dilakukan.

Teknologi turbin angin skala besar telah berkembang dengan baik, namun, turbin angin skala kecil perlu penelitian lebih, karena struktur yang berbeda dan aplikasi yang tidak sama dari skala besar. Berbeda dengan turbin angin skala besar, yang harus berada di daerah dengan kondisi angin optimal, turbin angin skala kecil tidak harus berada pada kondisi angin terbaik. Lokasi ini dapat berada di daerah perkotaan di mana angin mungkin bergolak dan terhalang oleh bangunan dan karena lemah atau di daerah di mana kecepatan angin rendah, yang ditentukan oleh lokasi geografis.

Terdapat dua jenis turbin angin berdasarkan arah gerakannya, yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal. Turbin angin sumbu vertikal terdapat 3 jenis utama yaitu jenis Savonius, Darrieus dan tipe H. Pada dasarnya faktor penting yang menentukan efisiensi turbin adalah bentuk dan geometri dari sudu, seberapa efektif profil tersebut beroperasi pada berbagai kecepatan angin untuk menghasilkan koefisien daya ( $C_p$ ) terhadap rasio kecepatan ujung (*Tip speed ratio*/TSR)

yang tinggi. Faktor lain adalah memiliki *startup* yang efektif dan torsi yang tinggi pada kecepatan angin tertentu.



Penggunaan turbin angin Savonius sebagai tenaga penggerak menjadi salah satu alternatif yang telah banyak dikembangkan oleh para peneliti, dan dapat menjadi solusi untuk tenaga penggerak dengan biaya rendah dan dampak lingkungan yang rendah. Perangkat angin yang dikembangkan oleh S.J. Savonius pada tahun 1920 (Savonius, 1925), memiliki keuntungan antara lain: konstruksi yang cukup sederhana dengan biaya pembuatan yang relatif rendah, penerimaan angin dari arah manapun untuk operasi, dan memiliki berbagai pilihan konfigurasi rotor sesuai kebutuhan. Turbin angin Savonius cocok untuk kecepatan angin rendah berkisar antara 1.5 – 6 m/s, dan dengan durasi angin yang lebih pendek. Turbin angin tipe ini lebih banyak diaplikasikan sebagai tenaga penggerak, misalnya untuk menggerakkan pompa irigasi (Modi, Roth, dan Pittalwala 1983; Rabah dan Osawa 1996), sistem penerangan jalan (Ricci dkk. 2016), dan juga dapat digunakan untuk pembangkit listrik skala kecil (Menet 2004). Sehingga hal ini menjadi dasar pertimbangan bahwa turbin angin Savonius dapat menjadi alternatif teknologi yang perlu diteliti dan dikembangkan selain jenis turbin angin lainnya.

Beberapa penelitian baik pengujian secara eksperimental maupun numerik, telah banyak ditemukan dalam literatur teknis dan ilmiah. Konfigurasi dan susunan yang berbeda dari turbin angin Savonius telah dipelajari, dan disimpulkan bahwa setiap konfigurasi membuktikan

signifikan yang berbeda. Hasil yang dipublikasikan menunjukkan kinerja rotor Savonius dipengaruhi oleh kondisi operasional,



geometris dan parameter aliran udara. Rentang nilai yang dilaporkan untuk koefisien daya maksimum rata-rata berkisar pada nilai 0,05-0,30, untuk sebagian besar pengaturan turbin (Akwa, Gilmar Alves da Silva, dan Petry, 2012).

Beberapa kajian mengenai Savonius rotor menitikberatkan pada model dan bentuk Savonius rotor. Secara umum bentuk Savonius rotor pada mulanya adalah *semi circular* atau setengah silinder, yang dipasang 2 buah atau lebih (Mahmoud dkk. 2012), yang kemudian oleh beberapa peneliti banyak dimodifikasi dengan perubahan parameter desain, antara lain aspek rasio (Kamoji, Kedare, dan Prabhu 2011), *overlap* rasio (Akwa, Gilmar Alves da Silva, dan Petry 2012), sudut kelengkungan sudu (Mao dan Tian 2015) dan modifikasi dengan membuat sudu *swirling* pada ujung dalamnya, yang menghasilkan peningkatan kinerja dengan  $Cp_{max}$  sebesar 0.2156 (Al-faruk dan Sharifian, 2016). Selain itu pengembangan model Savonius juga dapat berbentuk *helical* (sudu savonis dipuntir dengan sudut puntiran/*twist* tertentu) yang menghasilkan peningkatan kinerja yang lebih baik (Anbarsooz, 2016; Lee, Lee, dan Lim, 2016; Damak, Driss, dan Abid, 2013; Zhao et al. 2009).

Selain itu, bentuk sudu lain yang pernah diusulkan selain *semi circular* adalah tipe *Bach* dengan bentuk sudu yang tidak sepenuhnya melengkung, tetapi terdapat bagian dengan sudu lurus (*straight blade*).

(Fernando 1989)) melakukan studi eksperimental, visualisasi dan pemodelan semi-empiris pada sudu tipe *Bach* ini, diperoleh



$Cp_{max}$  sebesar 0.32 pada konfigurasi optimal dari Savonius rotor terkait geometri sudu yaitu *gap size* ( $a/d$ ) =0; *blade overlap* ( $b/d$ ) = 0; *aspect ratio* ( $A$ ) =0.77; *blade shape parameters* ( $p/q$ ) =0.2; *blade arc angle* ( $\theta$ ) =135°. (M. A. Kamoji, Kedare, dan Prabhu 2009a), melakukan studi eksperimental dengan memodifikasi sudu Savonius tipe *Bach* tanpa menggunakan poros, di mana diperoleh  $Cp_{max}$  sebesar 0.21 pada sudu dengan *overlap ratio* 0, sudut kelengkungan sudu sebesar 124° dan aspek rasio 0.7 serta pada bilangan Reynold 150.000, yang dibandingkan dengan  $Cp$  model *semi-circular* sebesar 0.19.

Kacprzak dkk melakukan simulasi numerik untuk membandingkan kinerja sudu Savonius *semi-circular*, bentuk *elliptic* dan *tipe Bach* yang menghasilkan  $Cp_{max}$  pada tipe *Bach* sebesar 0.18, kemudian tipe *Elliptical* dengan  $Cp$  sebesar 0.17 dan terakhir *semi-circular* sebesar 0.15, yang semuanya terjadi pada *Tip speed ratio* 0.8 (Kacprzak, Liskiewicz, dan Sobczak, 2013). Sementara Roy dan Saha melakukan pengujian eksperimental dengan terowongan angin untuk optimasi sudu berdasarkan tipe *Bach* yang dimodifikasi, yang juga dibandingkan dengan model *semi-circular*, *semi-elliptic*, dan *benesh type*. Hasil optimasi mendapatkan profil baru yang memiliki kinerja yang lebih baik dengan  $Cp_{max}$  0.31, dibandingkan dengan *modified Bach*, *benesh type*, *semi-elliptic* dan *semi-circular* berturut – turut sebesar 0.3; 0.29; 0.26 dan 0.23) (Roy a, 2015).



Kinerja turbin angin Savonius juga dapat ditingkatkan dengan penambahan komponen atau bagian pada sudu yang diharapkan berfungsi untuk mempercepat aliran, mengarahkan atau mengkonsentrasikan aliran, mengalihkan atau menghalangi aliran maupun untuk membagi aliran. Beberapa penelitian yang mengkaji hal tersebut antara lain dengan penambahan fin dibagian dalam sudu, di mana menghasilkan kinerja terbaik atau  $C_{p_{max}}$  sebesar 0.11 menggunakan 1 fin (Hasan, Hantoro, dan Nugroho 2013). Penambahan sudu kuartier ganda pada bagian dalam sudu ditemukan dapat meningkatkan kinerja turbin antara 8.89% sampai 13.69% pada berbagai kecepatan aliran (Sharma dan Sharma 2016).

Metode lain untuk meningkatkan kinerja turbin angin Savonius adalah dengan penggunaan augmentasi sehingga angin dapat terkonsentrasi pada arah yang diharapkan misalnya dengan pemasangan jendela pengarah atau *curtain* (Altan dan Atilgan, 2012), penggunaan *concentrated* dan *oriented jet*, yang menghasilkan peningkatan kinerja dengan  $C_{p_{max}}$  0.32 (Roy dan Saha, 2014), serta penambahan *wind booster*, yang memperlihatkan peningkatan kinerja pada kondisi kecepatan angin rendah, melalui simulasi numerik CFD (Korprasertsak dan Leephakpreeda, 2015). Selain penggunaan pengarah, peningkatan kinerja juga dapat dilakukan dengan mengurangi tekanan pada sisi belakang dari

yang menghadap arah aliran angin (*advancing blade*) melalui dengan *downstream baffle*, yang dapat meningkatkan 40-50%



kinerja turbin Savonius dibandingkan dengan tanpa *baffle* (El Baz dan Mahmoud, 2015). Penambahan *obstacle* pada sisi sudu yang membelakangi arah aliran angin (*returning blade*), meningkatkan kinerja turbin Savonius sebesar 40% pada *tip speed ratio* 0.7 (Mohamed dkk. 2011).

Pengaruh jumlah sudu Savonius juga telah banyak diinvestigasi oleh beberapa peneliti, yang menemukan keterkaitan antara jumlah sudu Savonius dengan kinerjanya. Turbin Savonius dengan tiga sudu menghasilkan kecepatan putar yang lebih tinggi dibandingkan dengan dua sudu dan empat sudu, namun turbin angin dengan empat sudu menghasilkan torsi yang lebih tinggi (Wenehenubun, Saputra, dan Sutanto 2015), (Ali, 2013). Secara spesifik, turbin angin Savonius tiga sudu diteliti oleh Morshed dengan pengujian eksperimental terowongan angin dan simulasi numerik CFD, menemukan bahwa model turbin tanpa *overlap* menghasilkan koefisien aerodinamis yang lebih baik, namun pada bilangan reynold yang lebih rendah, model dengan *overlap* menengah memberikan hasil yang lebih baik (Morshed dkk. 2013).

Turbin angin Savonius yang dipasang lebih dari satu tingkat juga berkontribusi memberikan pengaruh pada kinerja yang dihasilkan. (Frikha dkk. 2016) melakukan pengujian secara eksperimental dan simulasi numerik untuk melihat karakteristik turbin angin Savonius *multi stage*.

ri penelitian ini diperoleh bahwa koefisien daya dan kecepatan meningkat seiring dengan peningkatan jumlah tingkat, di mana



$C_{p_{max}}$  diperoleh sebesar 0.132 pada turbin Savonius lima tingkat. Namun untuk aspek rasio yang sama, turbin angin Savonius dua tingkat menghasilkan kinerja yang lebih baik ( $C_p=0.29$ ) dibandingkan dengan satu tingkat ( $C_p=0.18$ ) dan tiga tingkat ( $C_p=0.23$ ) (Saha, Thotla, dan Maity 2008).

Dari beberapa penelitian yang telah diungkap di atas, terlihat bahwa sudu Savonius tipe *Bach* memiliki keunggulan dari sisi kinerja dibandingkan sudu model konvensional atau *semi-circular* dan model *Elliptical*. Meskipun demikian, kajian tentang model ini belum banyak diinvestigasi jika dibandingkan dengan model *semi-circular*. Kajian yang telah ada berfokus pada sudu lengkung (*circular blade*), misalnya dengan variasi sudut kelengkungan (Roy dan Saha 2013) serta modifikasi bentuk kelengkungannya (Roy dan Saha 2015). Berdasarkan bentuk geometri tipe *Bach*, masih terdapat kemungkinan pengembangan yang belum diungkap secara mendalam oleh peneliti – peneliti sebelumnya, khususnya pada bagian sudu lurus (*straight blade*). Bagian ini juga cukup penting karena dapat mempengaruhi kondisi pergerakan aliran udara melewati sudu sehingga menghasilkan gaya dorong untuk memutar turbin. Modifikasi yang dimaksud adalah dengan menekuk sudu lurus ke arah dalam dan keluar membentuk sudut tertentu, dengan variasi parameter lainnya untuk memperoleh konfigurasi yang optimal. Adanya perubahan

ung sudu ini diperoleh dapat mempengaruhi kinerja turbin





Savonius, sebagaimana telah dilakukan pada model *semi-circular*, dengan metode *swirling* (Al-faruk dan Sharifian 2016).

Berdasarkan uraian di atas, maka dalam penelitian ini akan difokuskan kajian berkaitan dengan modifikasi bentuk geometri sudu Savonius tipe *Bach* terutama pada bagian sudu lurus (*straight blade*), untuk mendapatkan kinerja yang optimal dengan kemampuan untuk menghasilkan torsi pada kecepatan angin tertentu. Kinerja dari model turbin angin Savonius yang diusulkan akan diuji secara numerik dengan komputasi fluida dinamik (CFD) fluent dan secara eksperimental dengan pengujian pada terowongan angin.

## B. Hipotesis

Berdasarkan hasil studi literatur, dinyatakan hipotesis penelitian sebagai berikut :

- a. Perubahan bentuk geometri sudu tipe *Bach* pada bagian sudu lurus (*straight blade*) berupa tekukan ke arah dalam dan ke luar, akan mempengaruhi pola aliran fluida dan distribusi tekanan yang melewati permukaan sudu yang statis terutama pada area *overlap* antara dua sudu lurus. Perubahan kecepatan dan tekanan akan menyebabkan perubahan gaya aerodinamis yang terjadi pada rotor secara keseluruhan. Perubahan gaya tersebut akan mempengaruhi

kinerja aerodinamis dari rotor, di mana kinerja statis ini akan



berkontribusi terhadap seberapa baik rotor Savonius untuk dapat bergerak atau memulai sendiri pada sudut tertentu.

- b. Perubahan bentuk geometri sudu tipe *Bach* pada bagian sudu lurus (*straight blade*) berupa tekukan ke arah dalam dan ke luar, juga akan menyebabkan perubahan momentum yang terjadi pada sudu. Perubahan momentum ini akan mempengaruhi gaya dorong pada rotor, yang selanjutnya akan mendorong rotor sehingga terjadi perubahan kecepatan putar rotor. Di mana dengan putaran yang besar akan memicu torsi yang besar pula. Torsi yang besar inilah yang diharapkan akan meningkatkan kinerja dinamis dari turbin Savonius yang dikaji.

### C. Rumusan Masalah

Dari analisis di atas maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan terkait dengan penelitian yang akan dilakukan :

1. Bagaimana mengembangkan model sudu tipe *Bach* dengan modifikasi pada bagian sudu lurus dengan pendekatan simulasi CFD untuk mendapatkan kinerja statis yang lebih baik.
2. Bagaimana menguji model turbin angin Savonius tipe *Bach* dengan modifikasi sudut sudu lurus dengan pendekatan eksperimental untuk mendapatkan kinerja statis turbin angin Savonius.



3. Bagaimana menguji model turbin angin Savonius tipe *Bach* dengan modifikasi sudut sudu lurus melalui simulasi numerik CFD untuk mendapatkan kinerja dinamis turbin angin Savonius.
4. Bagaimana menguji model turbin angin Savonius tipe *Bach* dengan modifikasi sudut sudu lurus dengan pendekatan eksperimental untuk mendapatkan kinerja dinamis turbin angin Savonius.

#### D. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengembangkan model sudu tipe *Bach* dengan modifikasi pada bagian sudu lurus dengan pendekatan simulasi CFD untuk mendapatkan kinerja statis dengan variasi sudut putar rotor.
2. Menguji model turbin angin Savonius tipe *Bach* dengan modifikasi sudut sudu lurus dengan pendekatan eksperimental untuk mendapatkan kinerja statis dengan variasi sudut putar rotor.
3. Menguji model turbin angin Savonius tipe *Bach* dengan modifikasi sudut sudu lurus melalui simulasi numerik CFD untuk mendapatkan kinerja dinamis turbin angin Savonius.
4. Menguji model turbin angin Savonius tipe *Bach* dengan modifikasi sudut sudu lurus dengan pendekatan eksperimental untuk mendapatkan kinerja dinamis turbin angin Savonius.



### E. Batasan Masalah

Mengingat kompleksitas masalah yang dihadapi, maka dalam penelitian ini diambil batasan masalah berdasarkan kondisi sebagai berikut :

1. Udara dianggap fluida tak mampu mampat dan mengalir secara seragam pada aliran bebas jauh di hulu.
2. *Drag* yang dikaji adalah form *drag*
3. Model rotor yang digunakan dengan dimensi : diameter turbin ( $D_i$ ) dan tinggi turbin ( $H$ ) sebesar 0,195 m (aspek rasio 1 atau  $D / H = 1$ ), ketebalan sudu dan pelat ujung ( $t$ ) sebesar 3 mm.
4. Diameter pelat ujung ( $D_o$ ) dibuat lebih besar 10% dari diameter rotor.
5. Kecepatan rata-rata udara sebesar 10,1 m/s dengan bilangan Reynolds  $Re = 1,2 \times 10^5$ , sesuai dengan dimensi rotor.
6. Metode yang digunakan adalah metode komputasi dengan model turbulensi k-epsilon standard untuk simulasi statis dan model turbulensi  $\kappa-\omega$  SST untuk simulasi dinamis, kemudian metode eksperimen dengan pengujian wind tunnel seksi uji tipe tertutup untuk kinerja statis dan seksi uji tipe terbuka untuk kinerja dinamis, dengan pengukuran mekanis dan pengukuran load cell.

### F. Keterbaruan Penelitian

Unsur keterbaruan yang terdapat pada penelitian ini terletak pada

atau bentuk sudu turbin Savonius tipe *Bach*, berupa modifikasi geometri, terutama pada bagian sudu lurus. Hal ini dilakukan



dengan menekuk sudu lurus ke arah dalam dan keluar membentuk sudut tertentu, dengan variasi jarak *overlap* sudu, untuk memperoleh konfigurasi yang optimal sehingga menghasilkan kinerja statis dan kinerja dinamis yang lebih baik. Modifikasi pada model sudu tipe *Bach* masih terbatas pada sudu lengkungnya saja, belum ada studi pada bagian sudu lurus. Adapun studi pada bagian ujung sudu dalam, sejauh ini lebih banyak dilakukan pada model semi-circular atau setengah lingkaran. Berdasarkan hasil penelusuran penelitian – penelitian terdahulu mengenai turbin angin Savonius, belum ditemukan kajian yang membahas mengenai model dan konfigurasi yang diusulkan.

Selain itu, dari pengembangan model yang telah diperoleh, memungkinkan untuk dikembangkan dalam penelitian lanjut, dengan penambahan komponen atau bagian pada sudu untuk memaksimalkan daya yang akan dihasilkan. Pada umumnya metode peningkatan kinerja turbin Savonius dengan penambahan komponen atau bagian pada turbin angin Savonius, kebanyakan menggunakan model sudu *semi-circular*. Adapun pada sudu tipe *Bach*, kajian – kajian sejauh ini masih terbatas pada optimasi geometri sudu.

### G. Manfaat / Kegunaan Penelitian

Penelitian ini bermanfaat dalam mendukung upaya pengembangan perbarukan dari sektor potensi energi angin yang dapat digunakan tenaga penggerak atau pembangkit daya baik skala kecil maupun



menengah. Kendala yang dihadapi dalam pengembangan energi terbarukan dari sector energi angin adalah ketersediaan peralatan konversi energi angin yang sulit diperoleh, umumnya karena masih mahal dan teknologi yang cukup kompleks. Padahal beberapa peralatan konversi energi angin dapat dikembangkan secara mandiri dengan konstruksi yang sederhana, mudah dibuat dan biaya yang relatif murah, seperti turbin angin Savonius. Oleh karena itu, diharapkan hasil dari penelitian ini akan memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan terutama berkaitan dengan pemanfaatan energi angin menggunakan perangkat konversi angin dengan konstruksi yang sederhana, lebih murah dan efisien, yang dapat dikembangkan oleh masyarakat untuk memenuhi kebutuhan akan penyediaan energi.

## H. Ruang Lingkup Penelitian

Cakupan kegiatan penelitian yang menjadi target kajian antara lain :

1. Penelitian akan dilakukan secara simulasi numerik CFD FLUENT dengan model sudu yang telah ditentukan, baik secara statis dan maupun dinamis.
2. Model sudu diuji secara eksperimental, secara statis dan dinamis, pada kecepatan angin yang telah ditentukan, menggunakan pengujian *close type* dan *open test section* pada terowongan angin dengan parameter yang diukur meliputi gaya, putaran dan torsi.



3. Paramater utama yang akan diperoleh adalah koefisien torsi dan koefisien daya terhadap *tip speed ratio* (TSR) untuk memperoleh gambaran kinerja yang optimal dari model turbin angin Savonius yang diusulkan.

## H. Sistematika Penelitian

Kegiatan penulisan disertasi hasil penelitian ini disusun secara bertahap dengan sistematika sebagai berikut :

**Ringkasan**, yakni mengungkap secara ringkas dan jelas tentang latar belakang masalah, tujuan yang ingin dicapai, bentuk metode yang digunakan/dirancang untuk mencapai tujuan, manfaat yang diperoleh dari hasil penelitian, serta luaran (*outcome*) yang dihasilkan.

### **Bab I Pendahuluan;**

Mengungkapkan tentang berbagai fakta, permasalahan mengenai kinerja turbin angin Savonius dengan berbagai variable penelitian, hal – hal yang sudah diungkap oleh peneliti sebelumnya yang menjadi acuan dan referensi serta kemungkinan pengembangan yang belum diungkapkan sehingga perlu dikaji lebih jauh. Latar belakang masalah selanjutnya disajikan dalam bentuk Rumusan masalah, tujuan penelitian, serta manfaat/kegunaan dari penelitian. Unsur kebaruan (*novelty*) penelitian, ruang lingkup kegiatan penelitian,

### **tinjauan Pustaka;**





Memuat tentang berbagai sumber kajian literatur yang diperoleh dari textbook yang sesuai, terutama berkaitan dengan persamaan – persamaan dasar aliran fluida, kajian tentang daya energi angin, jenis turbin angin, serta riset - riset terbaru yang relevan sebagai referensi pembanding berkaitan dengan parameter geometri yang berpengaruh terhadap kinerja turbin angin, dan parameter penelitian lainnya.

### **Bab III Metode Penelitian;**

Membahas kerangka pikir penelitian, model sudu yang diteliti, metode penelitian, tempat dan waktu penelitian, serta diagram alir pelaksanaan penelitian. Metode penelitian yang digunakan berupa simulasi numerik CFD pada sudu turbin angin Savonius serta metode penelitian secara eksperimental dengan parameter dan variabel penelitian yang telah ditentukan.

### **Bab IV Hasil dan Pembahasan;**

Memuat tentang hasil – hasil yang diperoleh, baik melalui proses simulasi numerik CFD yang dilakukan secara statis dan dinamis dan juga secara eksperimental. Simulasi statis dimaksudkan untuk mendapatkan kinerja aerodinamis dari sudu yang diuji berupa parameter koefisien *drag* dan koefisien *lift*, pada berbagai posisi sudut rotor. Sedangkan simulasi dinamis dilakukan untuk mendapatkan kinerja rotor secara keseluruhan dengan rotor berupa koefisien torsi dan koefisien daya, pada berbagai nilai

d rasio. Hasil – hasil kajian yang diperoleh ditampilkan ditampikan bentuk gambar dan grafik. Pembahasan terhadap data – data



dalam gambar dan grafik dilakukan dengan membuat narasi yang akan menjelaskan fenomena – fenomena yang terjadi serta berorientasi pada jawaban atas tujuan penelitian. Selain itu, bab ini berisi tahapan penelitian lanjutan, berupa studi eksperimental dengan membuat prototype model sudu yang yang diuji dengan menggunakan terowongan angin. Hasil yang diperoleh berupa kinerja rotor dalam parameter koefisien torsi dan koefisien daya terhadap *tip speed ratio* (TSR).

### **Bab V Penutup;**

Meliputi penulisan kesimpulan dan saran. Penulisan kesimpulan memuat sejumlah hasil pembahasan yang sekaligus menjawab tujuan – tujuan penelitian. Saran – saran diperlukan atas kekurangan-kekurangan dalam penelitian, dan bahkan kegiatan penelitian yang telah dilakukan memerlukan kajian lebih jauh lagi.

### **Daftar Pustaka;**

Merupakan daftar kajian referensi atau literatur yang erat kaitannya dengan penelitian dibidang turbin angin Savonius, yang bersumber terutama dari jurnal – jurnal penelitian terbaru.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### A. Persamaan Dasar Aliran Fluida

Dinamika fluida terdiri dari tiga persamaan dasar yaitu konservasi massa, momentum dan energi. Pembahasan tentang hukum konservasi ketiga hal di atas merupakan dasar persamaan pembentukan aliran. Pendekatan-pendekatan yang sering di gunakan sebagai analisis aliran fluida adalah volume kendali (integral, skala besar), analisa differensial (diferensial, skala kecil), analisis eksperimental (analisis dimensional).

##### 1. Kekekalan Massa

Kekekalan Massa mensyaratkan agar massa  $M$ , sebuah sistem tetap konstan selagi sistem tersebut bergerak melalui medan aliran (Munson dkk. 2013). Dalam bentuk persamaan prinsip ini dinyatakan sebagai :

$$\frac{DM_{sys}}{Dt} = 0 \quad (1)$$

Dengan menggunakan pendekatan volume atur, pernyataan kekekalan massa ditulis sebagai :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho \, dV + \int_{cs} \rho \, V \cdot \hat{n} \, dA = 0 \quad (2)$$

persamaan tersebut (yang biasa disebut sebagai persamaan (2)) dapat diterapkan pada sebuah volume atur terhingga (cv), yang dibatasi oleh permukaan atur (cs).



Pernyataan yang sering digunakan untuk laju aliran massa, melalui sebuah bagian dari permukaan atur dengan luas  $A$  adalah

$$\dot{m} = \rho Q = \rho AV \quad (3)$$

di mana  $\rho$  adalah densitas,  $Q$  adalah laju aliran volume ( $\text{ft}^3/\text{s}$  atau  $\text{m}^3/\text{s}$ ), dan  $V$  adalah komponen kecepatan fluida yang tegak lurus bidang  $A$ .

Dalam bentuk differensial, persamaan kekekalan massa dituliskan :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Persamaan kontinuitas adalah salah satu persamaan dasar mekanika fluida dan, seperti yang diungkapkan dalam persamaan (4), berlaku untuk aliran stedi dan unsted, dan kompresibel atau inkompresibel. Dalam notasi vektor, persamaan (4) dapat ditulis sebagai

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{V} = 0 \quad (5)$$

Dua kasus khusus adalah kepentingan tertentu. Untuk aliran fluida kompresibel

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{V} = 0 \quad (6)$$

Atau

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

## 2. Kekekalan Momentum

Menurut kedua Newton dari gerak sebuah sistem menyatakan laju perubahan terhadap waktu dari momentum linear sistem sama dengan jumlah dari gaya – gaya yang bekerja pada sistem. Karena



momentum adalah massa dikalikan dengan kecepatan, maka momentum dari sebuah partikel kecil adalah massa  $\rho dV$  (Munson dkk. 2013) Jadi, momentum dari seluruh sistem adalah  $\int_{sys} V \rho dV$  dan hukum Newton menjadi

$$\frac{D}{Dt} \int_{sys} V \rho dV = \Sigma F_{sys} \quad (8)$$

Di mana :

$$F_{sys} = \Sigma F_{kandungan\ volume\ atur\ yang\ berimpit} \quad (9)$$

Maka :

$$\frac{D}{Dt} \int_{sys} V \rho dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} V \rho dV + \int_{cs} V \rho V \cdot n dA \quad (10)$$

Laju perubahan terhadap waktu dari momentum system linear	=	Laju perubahan terhadap waktu dari momentum linear kandungan volume atur	+	Laju aliran netto dari momentum linear melewati permukaan atur
---	---	--	---	--

Untuk volume atur yang tetap (yang inersial) dan tidak berdeformasi, persamaan menjadi :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} V \rho dV + \int_{cs} V \rho V \cdot n dA = \Sigma F_{kandungan\ volume\ atur} \quad (11)$$

Yang disebut sebagai persamaan momentum linier.

Dalam bentuk persamaan differensial, persamaan momentum dapat dituliskan sebagai :

$$d\vec{F} = dm \frac{D\vec{v}}{Dt} = dm \left[ u \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right] \quad (12)$$



### Persamaan Energi – Hukum Pertama Termodinamika

Hukum pertama termodinamika untuk sebuah sistem dinyatakan dengan :

Laju pertambahan terhadap waktu dari energi tersimpan total dari suatu sistem = Laju netto pertambahan perpindahan energi dari kalor ke dalam sistem + Laju netto pertambahan energi dari kerja yang dipindahkan ke dalam sistem

Dalam bentuk simbolik, pernyataan ini menjadi :

$$\frac{D}{Dt} \int_{sys} e \rho dV = (\Sigma Q_{ke\ dalam} - \Sigma Q_{keluar})_{sys} + (\Sigma W_{ke\ dalam} - \Sigma W_{keluar})_{sys} \quad (13)$$

Atau

$$\frac{D}{Dt} \int_{sys} e \rho dV = (Q_{ke\ dalam\ netto} + W_{ke\ dalam\ netto})_{sys} \quad (14)$$

Di mana  $e$ , adalah energi tersimpan total per satuan massa dari setiap partikel di dalam sistem :

$$e = \check{u} + \frac{v^2}{2} + gz \quad (15)$$

Berdasarkan persamaan volume atur, untuk hukum pertama termodinamika dinyatakan sebagai:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} e \rho dV + \int_{cs} e \rho V \cdot \hat{n} dV = (Q_{ke\ dalam\ netto} + W_{ke\ dalam\ netto})_{cv} \quad (16)$$

Laju perpindahan kerja,  $W$ , disebut juga *daya*, adalah positif jika kerja dilakukan oleh lingkungan sekitar pada kandungan volume atur. Dalam banyak kasus, kerja dipindahkan melintasi permukaan atur melalui sebuah poros yang bergerak, seperti turbin, kipas, dan baling-baling, sebuah poros yang berputar memindahkan kerja melintasi bagian permukaan atur yang mengiris poros tersebut. Untuk sebuah poros berotasi, perpindahan daya,  $W$  poros, berkaitan dengan torsi poros yang menyebabkan putaran,

dan kecepatan angular dari poros, dengan hubungan

$$W_{poros} = T_{poros} \omega \quad (17)$$



$$W_{poros\ ke\ dalam\ netto} = \Sigma W_{poros\ ke\ dalam} - \Sigma W_{poros\ keluar} \quad (18)$$

Dengan menggunakan informasi yang telah dikembangkan mengenai daya, kita dapat menyatakan hukum pertama termodinamika untuk kandungan volume atur yaitu :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} e \rho dV + \int_{cs} e \rho V \cdot \hat{n} dA = \dot{Q}_{net\ in} + \dot{W}_{shaft\ net\ in} - \int_{cs} p V \cdot \hat{n} dA \quad (19)$$

Apabila persamaan untuk energi tersimpan total (persamaan 2-15) ditinjau dengan persamaan (2-19), kita mendapatkan persamaan energi

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} e \rho dV + \int_{cs} \left( \check{u} + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} g z \right) \rho V \cdot \hat{n} dA = \dot{Q}_{net\ in} + \dot{W}_{shaft\ net\ in} \quad (20)$$

Berdasarkan rata-rata waktu untuk aliran yang satu dimensi, siklis dan melibatkan hanya satu arus fluida masuk dan keluar volume atur, diperoleh persamaan :

$$\dot{m} \left[ \check{u}_{out} - \check{u}_{in} + \left( \frac{p}{\rho} \right)_{out} - \left( \frac{p}{\rho} \right)_{in} + \frac{V_{out}^2 - V_{in}^2}{2} + g(z_{out} - z_{in}) \right] = \dot{Q}_{net\ in} + \dot{W}_{shaft\ net\ in} \quad (21)$$

Persamaan (21) disebut persamaan energi satu dimensi untuk aliran stedi secara rata-rata. Persamaan ini berlaku untuk aliran-aliran kompressibel dan inkompresibel. Dengan entalpi, dinyatakan :

$$\check{h} = \check{u} + \frac{p}{\rho} \quad (22)$$

Maka persamaan energi 1 dimensi aliran stedi secara rata-rata menjadi

$$\dot{m} \left[ \check{h}_{out} - \check{h}_{in} + \frac{V_{out}^2 - V_{in}^2}{2} + g(z_{out} - z_{in}) \right] = \dot{Q}_{net\ in} + \dot{W}_{shaft\ net\ in} \quad (23)$$

Persamaan ini sering digunakan untuk menyelesaikan persoalan aliran kompressibel.



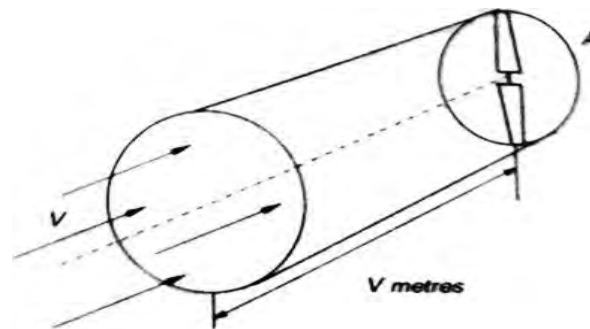
## B. Ketersediaan Daya Angin

Seperti diperlihatkan pada Gambar 2, dapat ditentukan laju aliran massa udara,  $dm/dt$ , melalui piringan rotor dengan luas bidang/penampang rotor  $A$ . Dari persamaan kontinuitas dalam mekanika fluida, laju aliran massa adalah fungsi dari kerapatan udara atau densitas  $\rho$ , dan kecepatan udara (diasumsikan seragam),  $v$ , dan diberikan dalam persamaan oleh:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (\text{kg/s}) \quad (24)$$

Maka energi kinetik aliran tersebut per satuan waktu (daya kinetik)

$$P_{kin} = \frac{1}{2}(\dot{m})v^2 = \frac{1}{2}(\rho \cdot A \cdot v)v^2 = \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{W}) \quad (25)$$



Gambar 2. Volume udara/detik,  $Av$  yang mengalir tiap detik melalui penampang  $A$ , menyatakan laju aliran massa udara  $\rho Av$  (kg/s) (Himran, 2005)

Hubungan di atas menyatakan 3 hal penting yaitu :

- 1) Daya angin berbanding lurus dengan massa jenis udara  $\rho$ . Misalnya, pada daerah pegunungan, daya angin lebih rendah dibandingkan dengan di dataran rendah untuk kecepatan angin yang sama.

Daya angin berbanding lurus dengan luas bidang rotor atau berbanding lurus dengan pangkat dua diameter rotor





- 3) Daya angin berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatan angin, sehingga penempatan kincir angin sebaiknya pada lokasi yang memiliki kecepatan angin yang tinggi 10% penambahan kecepatan memberikan 30% penambahan daya.

Tabel 2 menunjukkan bahwa kecepatan angin merupakan parameter penting dan secara signifikan mempengaruhi daya per satuan luas yang tersedia dari angin.

Tabel 2. Daya per unit area tersedia dari angin stabil (densitas udara  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ) (Manwell, McGowan, dan Rogers 2009)

Kecepatan Angin	Daya / Luasan ( $\text{W/m}^2$ )
0	0
5	80
10	610
15	2070
20	4900
25	9560
30	16550

Suatu rotor kincir angin dapat mengekstraksi daya dari aliran udara, karena rotor tersebut memperlambat aliran udara di mana kecepatan udara setelah rotor lebih rendah dari pada sebelum rotor. Daya maksimum yang diekstraksi dapat dicapai bila kecepatan angin sesudah rotor  $1/3$  kali kecepatan sebelum rotor. Dalam hal ini rotor akan merasakan kecepatan angin (kecepatan angin yang melalui rotor)  $2/3 v$ , sehingga massa udara efektif yang mengalir adalah  $\rho A 2/3 v$ . Karena kecepatan angin diperlambat dari  $v$  menjadi  $1/3 v$ , maka daya yang diekstraksi adalah :



$$= \frac{1}{2} \left( \rho \cdot A \cdot \frac{2}{3} v \right) (v)^2 - \frac{1}{2} \left( \rho \cdot A \cdot \frac{2}{3} v \right) \left( \frac{1}{3} v \right)^2$$

$$\left( \rho \cdot A \cdot \frac{2}{3} v \right) \left[ (v)^2 - \left( \frac{1}{3} v \right)^2 \right]$$

$$= \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \right) = 0.59 \left( \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \right) \quad (26)$$

Jadi fraksi maksimum daya teoritik yang diekstraksi adalah 16/27 atau 59,3 %. Fraksi maksimum ini dinamakan koefisien maksimum Betz (Betz 1926) sesuai nama peneliti bidang energi angin yang mendapatkan bilangan tersebut. Fraksi tersebut disebut koefisien daya  $C_p$  (bila massa udara real yang mengalir  $\rho A v$  dan bukan  $\rho A \frac{2}{3} v$ , maka koefisien daya menjadi  $\frac{16}{27} \times \frac{3}{2} = \frac{8}{9}$ ) di mana dalam praktek jarang melampaui harga 40% bila diukur sebagai daya mekanik yang dihasilkan oleh poros kincir. Nilai ini menurun bila daya mekanik poros diubah menjadi daya listrik ataupun daya air pada pemompaan, tergantung pada efisiensi  $\eta$ , transmisi, generator ataupun pompa. Nilai tersebut menurun lagi disebabkan oleh fluktuasi kecepatan dan arah angin yang terjadi dilapangan  $\eta_{fluk}$ . Relasi pendekatan awal output kincir untuk pemompaan air dari (dari “angin ke air”) pada suatu tempat dengan kecepatan angin rata-rata  $\bar{v}$  adalah

$$P_{hid} = 0.1 A \bar{v} \quad (27)$$

Di mana :

$$C_p=0.35 \quad \eta = 0.70 \quad \eta_{fluk} = 0.70 \quad \rho = 1.20 \text{ kg/m}^3$$

Sedang kincir angin untuk pembangkit listrik, faktor 0.1 berharga lebih besar menjadi 0.15 atau kadang – kadang 0.2 untuk kincir yang lebih baik. Pendekatan di atas dapat digunakan untuk memperkirakan output

p tahun atau tiap bulan sesuai dengan harga rata-rata kecepatan p tahun atau tiap bulan (Himran 2005).



### C. Rotor Kincir Angin

Kincir atau turbin angin merupakan mesin dengan sudu berputar yang mengonversikan energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Pada dasarnya hampir setiap benda dengan konfigurasi fisik tertentu akan menghasilkan gaya yang tidak simetri di dalam aliran udara, mengakibatkan benda tersebut berputar, berpindah, berosilasi sehingga daya angin dapat diekstraksi. Mesin pemanfaatan energi angin yang menggunakan rotor, dapat diklasifikasikan ke dalam tiga macam orientasi putar relatif terhadap aliran angin, yaitu:

- Rotor sumbu horizontal; yaitu sumbu putar parallel atau sejajar terhadap arah angin
- Rotor horizontal menyilang angin, yaitu sumbu putar horizontal terhadap permukaan bumi, dan tegak lurus pada arah aliran angin, menyerupai roda air
- Rotor sumbu vertikal; sumbu putar tegak lurus pada permukaan bumi dan pada aliran angin

Jika dilihat dari efisiensi, rotor sumbu horizontal lebih efektif dalam mengekstrak energi angin dibanding dengan rotor sumbu vertikal. Namun keunggulan rotor sumbu vertikal tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah, tidak membutuhkan struktur menara yang besar, konstruksi turbin sederhana, turbin angin sumbu vertikal dapat didirikan

di atas permukaan tanah, sehingga memungkinkan menempatkan



komponen mekanik dan komponen elektronik yang mendukung beroperasinya kincir angin (Himran 2005).

Secara garis besar, terdapat 2 model kincir angin sumbu vertikal, yaitu model Savonius dan darrieus. Turbin angin Darrieus merupakan turbin angin yang menggunakan prinsip aerodinamik dengan memanfaatkan gaya *Lift* pada penampang sudu rotornya dalam mengekstrak energi angin. Sedangkan turbin angin Savonius memanfaatkan gaya hambat. Turbin angin Savonius memiliki putaran dan daya yang rendah dibandingkan dengan turbin angin Darrieus. Meskipun demikian turbin Savonius tidak memerlukan energi awal memulai rotor untuk berputar yang merupakan keunggulan turbin ini dibanding turbin Darrieus.(Hau 2013).

#### D. Turbin Angin Savonius

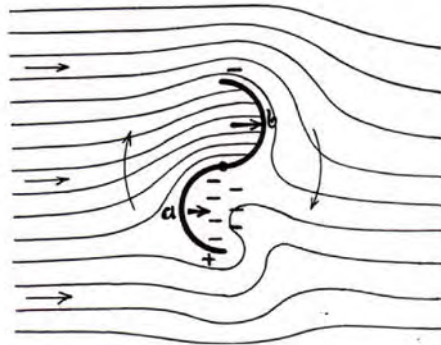
Rotor Savonius dikembangkan pertama kali pada tahun 1924 oleh Sigurd Johannes Savonius, seorang penemu berkebangsaan Finlandia. Konsep awal Savonius sendiri pertama kali dikembangkan oleh Anton Flettner, seorang penemu berkebangsaan Jerman. Savonius yang digunakan sebagai sebuah rotor, bentuknya dibuat dari sebuah silinder yang dipotong pada sumbu bidang sentral menjadi dua bagian dan bagian tersebut disusun menyilang menyerupai huruf S (Savonius 1925).

Prinsip kerja dari rotor Savonius dapat dijelaskan seperti terlihat pada

3. Dari gambar tersebut terlihat bahwa sudu yang bergerak  
arah angin melemparkan kembali udara yang menyebabkan

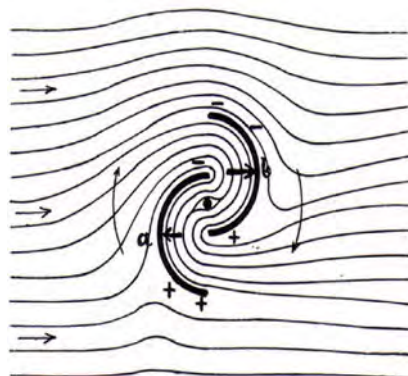


kecepatan angin meningkat di sisi sayap b. Sehingga tekanan tinggi positif (+) pada sayap a dan memungkinkan tekanan negatif (-) pada sayap b. Di bagian belakang sudu a, bergerak melawan angin terbentuk ruang hampa, yang bertindak sebagai rem.



Gambar 3. Perbedaan aliran udara dan tekanan yang disebabkan oleh Wing-Rotor dengan sudu tertutup di tengahnya. Terdapat kekosongan di bagian belakang sudu a

Jika kekosongan ini dapat dinetralkan, gerakan putar sekaligus dibebaskan dari hambatan terbesarnya dan kecepatan serta tenaga puntir akan meningkat secara signifikan. Solusi untuk mengatasi masalah tersebut kemudian ditunjukkan pada Gambar. 4.



4. Perbedaan aliran udara dan tekanan yang disebabkan oleh rotor dengan bukaan di antara sudu. Terdapat aliran yang halus dan tidak adanya ruang vakum di bagian belakang sudu a



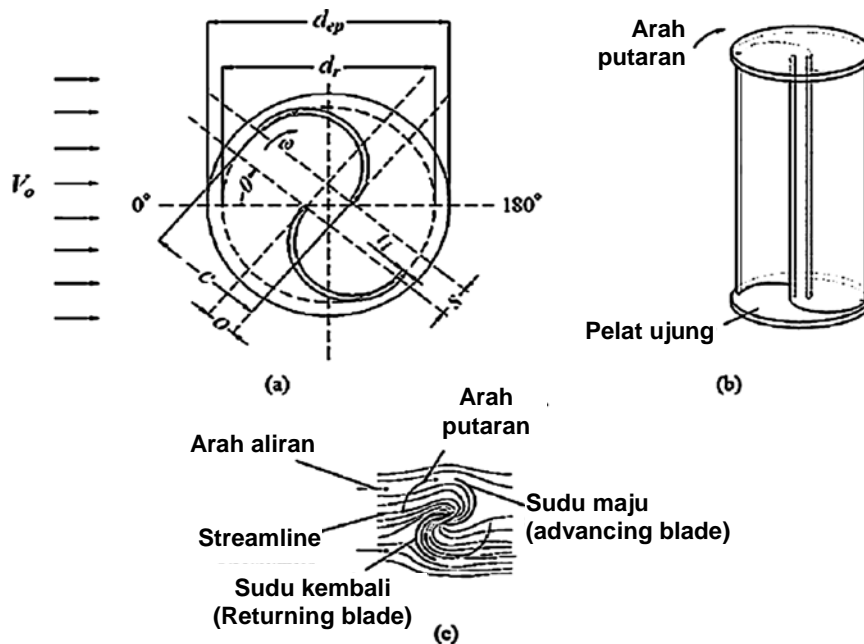
Sudu diatur sedemikian rupa sehingga terdapat lubang di tengah antara tepi bagian dalam dari dua sayap, di mana udara terbuka memiliki jalur bebas untuk melewatinya. Ketika angin mengenai permukaan bagian dalam sayap b, udara tidak kehilangan gaya dan menjadi sangat elastis, tetapi mengalir melalui celah tengah dan mengenai bagian dalam sayap a. Vakum yang cenderung terbentuk diatasi oleh udara yang mengalir melalui bukaan tetapi menyebabkan peningkatan lebih lanjut pada kecepatan udara yang mengenai sayap b. Efek dari perubahan ini berkontribusi pada kecepatan rotor yang meningkat menjadi 1,7 kali kecepatan angin dan kekuatan torsional naik 3 kali lebih besar daripada rotor dengan ukuran yang sama tetapi tanpa bukaan tengah dan 5 kali lebih besar dari pada rotor dengan sayap masih terpisah lebih jauh. Savonius menguji lebih dari 40 rotor mewakili berbagai ukuran, bentuk, dan jenis sudu, di mana sebagian dilakukan dengan angin alami dari kecepatan yang berbeda, dan sebagian pada aliran udara buatan. (Savonius 1925)

Parameter karakteristik dari kincir angin Savonius dengan dua profil sudu berbentuk setengah lingkaran dapat dilihat pada gambar 5. Pada Gambar. 5,  $t_i$  adalah ketebalan sudu,  $c$  chord sudu,  $o$  jarak *overlap* sudu,  $s$  jarak spasi sudu,  $d_r$  diameter rotor dan  $d_{ep}$  adalah diameter pelat ujung (*end plate*). Aliran angin dengan kecepatan  $V_o$  mengenai sudu turbin

kecepatan putar  $\omega$ . Berputar sepanjang posisi sudut yang ditentukan oleh  $\theta$  sehingga sudu bergerak dalam lintasannya, yang akan



memperlihatkan kontur yang berbeda pada angin, secara siklis mengubah koefisien *drag* dan *lift*.



Gambar 5. Skema sebuah rotor Savonius: (a) representasi 2D (b) representasi 3D; (c) pola aliran pada rotor Skema sebuah rotor Savonius: (a) representasi 2D (b) representasi 3D; (c) pola aliran pada rotor (Akwa, Vielmo, dan Petry 2012)

Dengan demikian, torsi yang dihasilkan oleh rotor, pada kecepatan konstan  $\omega$ , secara siklis bervariasi selama putaran dari turbin. Mekanisme operasi dari sebuah rotor Savonius dijelaskan mendetail dalam beberapa literatur (Fernando dan Modi 1989; Fujisawa 1992).

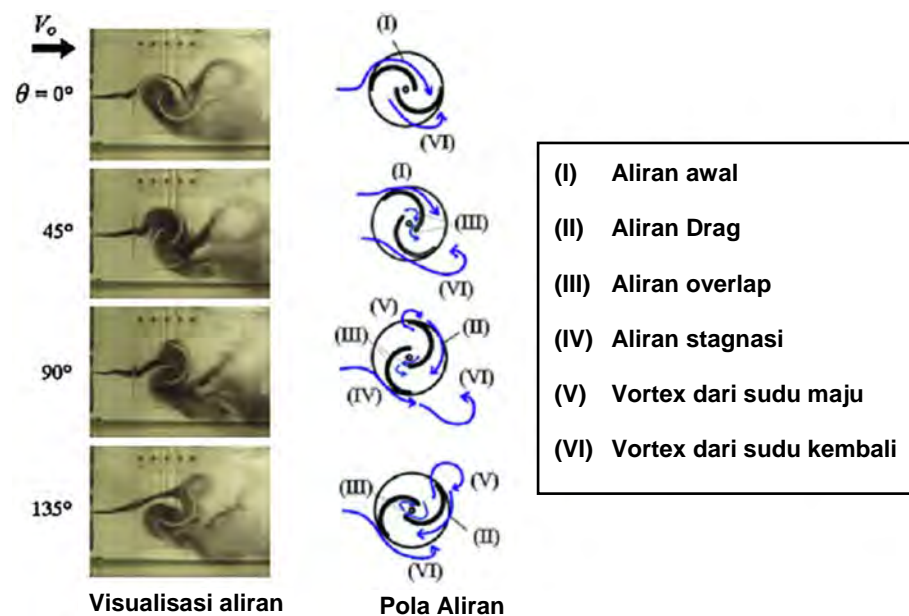
Operasi dari rotor Savonius dengan aliran utama yang terjadi pada sudu rotor selama operasi dijelaskan oleh Nakajima et al. (Nakajima, Iio, dan Ikeda 2008). Gambar 6 memperlihatkan visualisasi aliran melalui rotor

s yang beroperasi pada aliran air, teridentifikasi pola aliran utama

terjadi pada sudu rotor Savonius dan yang mempengaruhi



karakteristik operasional turbin ini. Aliran (I) menghasilkan *Lift*, (II) dan (III) mengembalikan tekanan pada sisi cekung sudu kembali/*returning blade*, dan (IV) mempengaruhi daya rotor. Aliran pada (I) diamati pada  $\theta$  hingga  $45^\circ$ . Aliran pada (I) menjadi aliran *drag* (II) ke sisi cekung sudu kembali. Sisa aliran menghasilkan *Lift* dan yang terakhir mengembalikan tekanan pada sisi cekung sudu, keduanya berkontribusi terhadap peningkatan koefisien daya rata-rata.



Gambar 6. Pola aliran pada rotor Savonius

*Vortex shedding* dari ujung sudu maju/*advancing blade* (V) terjadi pada  $\theta = 90^\circ$ . Selain itu *shedding vortex* dari ujung sudu kembali (VI) juga dihasilkan. Pada  $\theta$  lebih besar dari  $90^\circ$ , *shedding vortex* (V) dipisahkan

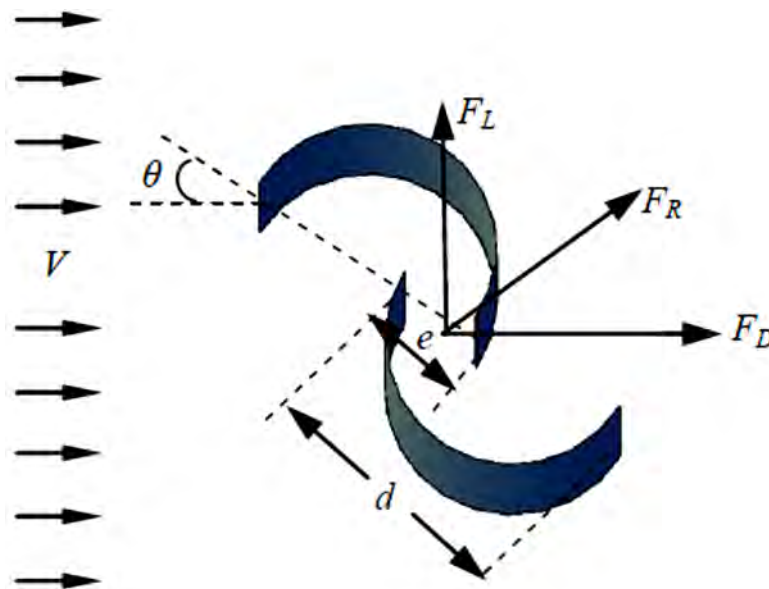
ng sudu maju dan berkembang sebagai aliran ke *downstream* dari aliran yang diidentifikasi oleh (IV) (V) dan (VI) pada Gambar 6, ibusi mengurangi daya rotor.





### E. Parameter Dasar

Rotor Savonius pada dasarnya beroperasi karena gaya *drag* angin yang bekerja pada sudu-sudunya, akan tetapi gaya *lift* juga dapat berkontribusi terhadap daya mekanis yang ditransmisikan ke poros (Chauvin dan Benhrib 1989; Irabu dan Roy 2011). Ke dua gaya aerodinamis utama yang bekerja pada turbin angin Savonius dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Gaya *drag* dan gaya *lift* pada turbin angin Savonius konvensional

Gaya *drag* didefinisikan sejajar dengan arah aliran udara yang datang.

Gaya *drag* disebabkan oleh gaya gesek viskos pada permukaan benda

datang yang tidak sama pada permukaan benda yang menghadap

ke depan dan menjauh dari aliran yang datang. Sedangkan gaya *lift*

didefinisikan sebagai gaya tegak lurus terhadap arah aliran udara yang



datang. Gaya *lift* merupakan konsekuensi dari tekanan yang tidak sama pada permukaan bagian atas dan bawah dari sebuah benda (Manwell, McGowan, dan Rogers 2009). Gaya *drag* dan gaya *lift* bergantung pada densitas fluida, kecepatan fluida, ukuran, bentuk, dan orientasi dari benda tersebut. Namun, akan lebih mudah untuk menggunakan parameter bilangan tak berdimensi yang tepat yang mewakili karakteristik *drag* dan *lift* dari benda, dalam parameter koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan koefisien angkat ( $C_L$ ) (Cengel dan Cimbala 2013). Koefisien ini didefinisikan sebagai:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A V^2} \quad (28)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho A V^2} \quad (29)$$

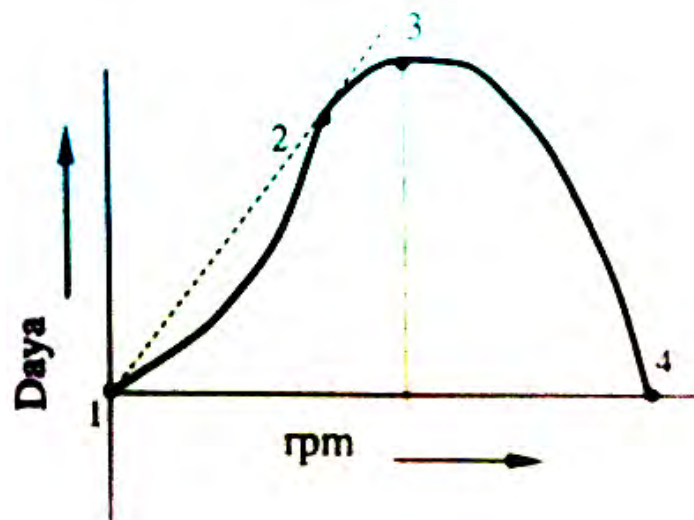
dimana  $A$  adalah area yang diproyeksikan pada bidang normal ke arah aliran dari benda. Dalam penghitungan *lift* dan *drag* dari beberapa benda tipis, seperti airfoil,  $A$  diambil sebagai area planform, yang merupakan area yang dilihat oleh seseorang yang melihat benda dari atas ke arah normal ke benda. Koefisien *drag* dan *lift* adalah fungsi primer dari bentuk benda, tetapi dalam beberapa kasus juga bergantung pada bilangan Reynolds dan kekasaran permukaan.

Sebuah rotor Savonius pada dasarnya bertujuan agar dapat mengekstraksi daya dari angin karena rotor tersebut menurunkan

kecepatan angin tidak terlalu banyak maupun tidak terlalu rendah. Suatu rotor yang diam, tidak menghasilkan daya sama sekali, demikian pula bila



rotor tersebut berputar sangat cepat, udara diblok secara sempurna oleh rotor (rotor bersifat sebagai piringan pejal). Dalam hal ini tidak ada daya yang dihasilkan oleh kincir. Di antara kedua harga ekstrim ini terjadi putaran optimum di mana daya yang diekstraksi adalah maksimum (Himran 2005). Kondisi ini dapat dilihat pada gambar 8. di bawah ini.



Gambar 8. Daya yang dihasilkan rotor sebagai fungsi putaran pada kecepatan angin tertentu

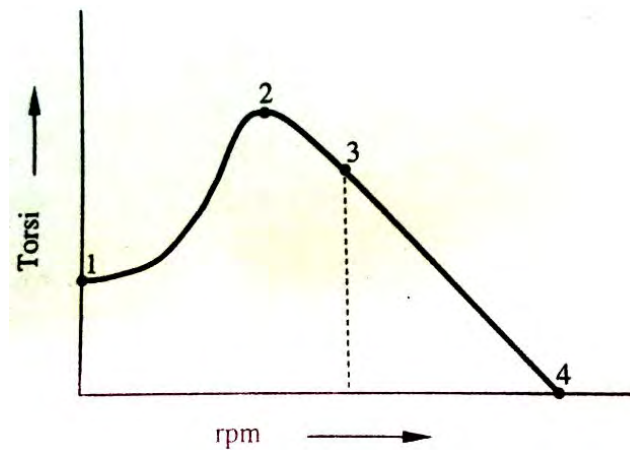
Jika sebuah pompa torak memberikan beban torsi konstan pada rotor kincir angin, maka untuk menentukan kurva torsi – putaran untuk rotor diperoleh dari gambar 6. Hubungan daya ( $P$ ), torsi ( $T$ ) dan putaran sudut ( $\omega$ ), sesuai persamaan :

$$P = \omega \times T = (2\pi \cdot N/60) \times T \text{ (W)} \quad (30)$$

Dari hubungan ini kemudian dapat diperoleh kurva torsi terkait putaran

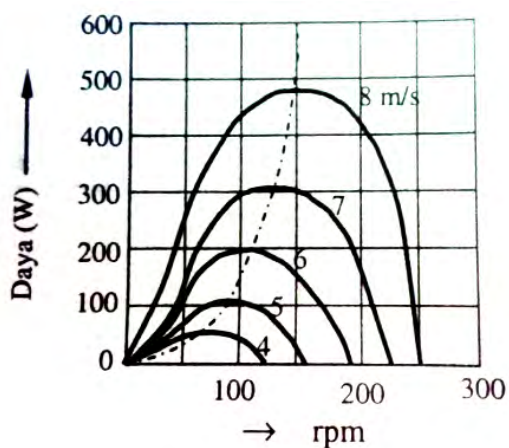
perti pada gambar 9.



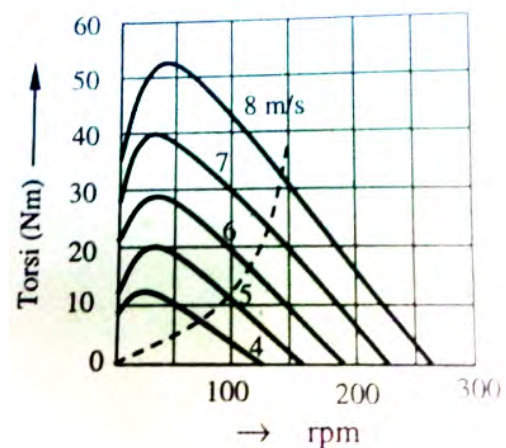


Gambar 9. Torsi dihasilkan rotor sebagai fungsi putaran pada kecepatan angin tertentu

Karena  $T = P/\omega$ , maka torsi adalah sama dengan garis yang melalui titik awal dan salah satu titik pada kurva  $P - \omega$ . Tangens ini mempunyai harga terbesar bila garis menyinggung kurva tersebut. Oleh karena itu, nilai torsi maksimum dicapai pada putaran lebih rendah daripada putaran pada daya maksimum.



(a)



(b)

10. Daya dan torsi sebagai fungsi putaran pada berbagai kecepatan angin



Pada gambar 10.a kurva – kurva daya pada kecepatan angin yang bertambah secara linear. Karena daya maksimum bertambah dengan  $V^3$  (persamaan 25), maka harga maksimum kurva  $P - \omega$  berada pada kurva  $\omega^3$ . Sehingga torsi maksimum bertambah dengan  $\omega^2$  (gambar 10.b).

Untuk maksud penyederhanaan, daya, torsi dan putaran dikelompokkan dalam parameter tak berdimensi sebagaimana relasi berikut:

$$\text{Koefisien daya : } C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot V^3} \quad (31)$$

$$\text{Koefisien torsi : } C_M = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot V^2 \cdot R} \quad (32)$$

Rasio kecepatan ujung (*tip speed ratio*) :

$$\text{TSR} = \lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (33)$$

$$\text{Maka : } C_P = C_M \cdot \lambda \quad (34)$$

Selain itu terdapat parameter lain, yaitu solidity factor,  $\sigma$

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{R} \quad (35)$$

Dengan :

$N$  = Jumlah Sudu;  $C$  = Chord;  $R$  = Jari – jari kincir angin

Dari relasi tersebut di atas sifat rotor dengan dimensi yang berbeda dan pada kecepatan angin berbeda dapat direduksi menjadi kurva – kurva:  $C_P - \lambda$  dan  $C_M - \lambda$ .

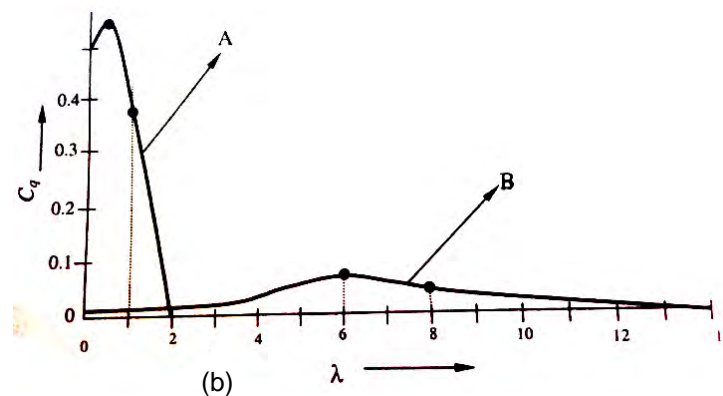
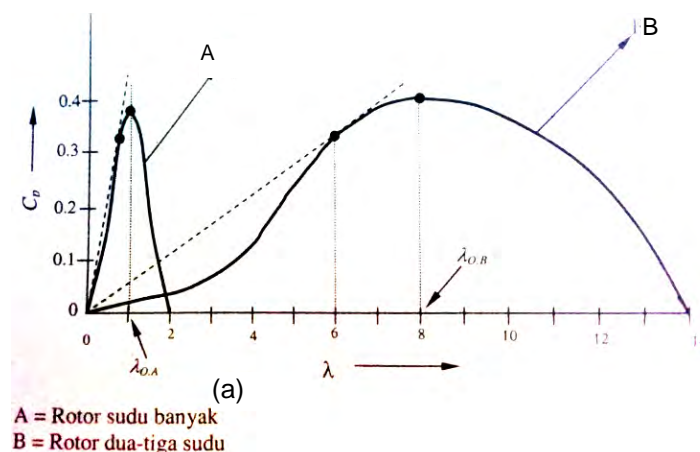
bedaan penting antara rotor – rotor menjadi jelas di mana rotor sudu banyak beroperasi pada ratio kecepatan ujung rendah dan



rotor dengan 2 atau 3 sudu beroperasi pada ratio kecepatan tinggi gambar 11. Juga kelihatan bahwa koefisien daya maksimum  $C_{pmax}$ , pada  $\lambda = \lambda_o$  untuk kedua tipe rotor tersebut tidak berbeda banyak namun koefisien torsi  $C_M$  berbeda sangat berarti baik pada torsi awal ( $\lambda=0$ ) maupun pada torsi maksimum. Hubungan empirik untuk menentukan koefisien torsi awal rotor sebagai fungsi ratio kecepatan ujung optimum adalah :

$$C_{q.awal} = \frac{0.6}{\lambda_o^2} \quad (36)$$

Relasi di atas menyatakan bahwa makin tinggi nilai  $\lambda_o$  makin rendah torsi awal, dan sebaliknya.



11. Kurva daya torsi tak berdimensi sebagai fungsi rasio kecepatan ujung (*tip speed ratio*)



TSR sebagai rasio kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan angin aliran bebas merupakan parameter tak berdimensi yang paling penting dalam menggambarkan efek parameter lain terhadap kinerja rotor Savonius. Sejak awal penelitian rotor Savonius, TSR telah menjadi obyek perhatian yang menarik bagi para peneliti. Dalam beberapa studi diamati bahwa koefisien daya ditemukan optimal pada TSR antara 0.7-1.0, sebagaimana dapat dilihat pada ringkasan tabel 2 berikut.

Tabel 3. Perbandingan TSR optimal dilaporkan oleh berbagai peneliti

Peneliti	TSR Optimum
▪ Sheldahl, Blackwell, dan Feltz ,1978	0.7 – 1.0
▪ Baird dan Pender, 1980	0.78
▪ Bergeles dan Athanassiadis, 1982	0.7
▪ Sivasegaram dan Sivapalan, 1983	0.75
▪ Bowden dan McAleese, 1984	0.68 – 0.72
▪ Fujisawa, 1992	0.9
▪ Huda dkk., 1992	0.68 – 0.71
▪ Fujisawa dan Gotoh, 1994	0.8 – 0.9
▪ M. Kamoji, Kedare, dan Prabhu, 2008	0.7 – 0.9
▪ M. A. Kamoji, Kedare, dan Prabhu, 2009	0.64 – 0.69
▪ D'Alessandro dkk., 2010	0.9 – 1.02
▪ Dobrevva dan Massouh, 2011	0.8

Adapun, secara umum, untuk posisi rotor Savonius dibandingkan dengan beberapa tipe rotor kincir air berdasarkan karakteristik dari  $C_p$  sebagai fungsi dari TSR atau beberapa referensi menuliskan dalam symbol  $\lambda$ , seperti diberikan pada Gambar 12. Dari gambar tersebut diperoleh beberapa kesimpulan :

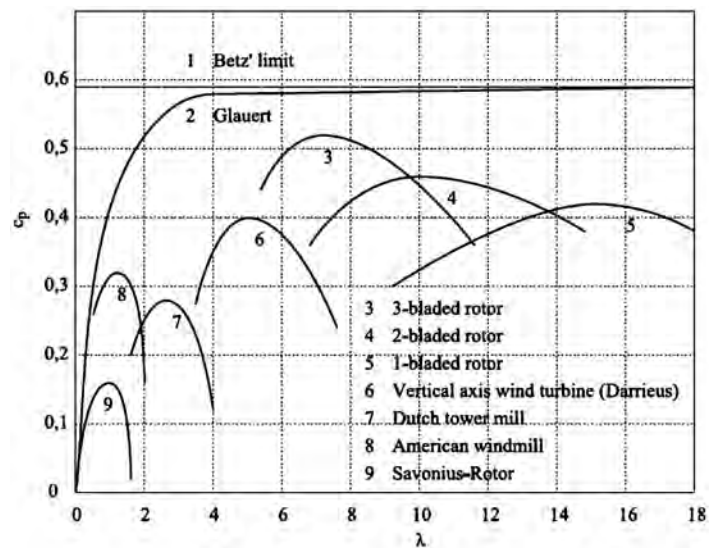
- Nilai  $C_p$  maksimum kira-kira 0,45. Secara normal dapat dicapai nilai

$p = 0,3 - 0,35$  dengan membuat sudu berbentuk kurva





- Rotor yang didesain dengan  $\lambda > 5$  memerlukan sudu dengan bentuk aerodinamis yang baik
- Rotor dengan  $\lambda$  yang tinggi digunakan sebagai penggerak generator listrik. Hal ini disebabkan generator listrik beroperasi pada putaran tinggi. Jadi makin tinggi nilai  $\lambda$  makin rendah nilai transmisi roda gigi dan makin rendah kerugian transmisi.



Gambar 12.  $C_p$  sebagai fungsi dari  $\lambda$  berbagai tipe rotor (Manwell, McGowan, dan Rogers 2009)

#### F. Parameter Yang Mempengaruhi Kinerja Rotor Savonius

Berdasarkan data yang terdokumentasi, efisiensi daya rata-rata dari rotor Savonius adalah sekitar 20% (J. Abraham dkk. 2012), yang jauh lebih rendah daripada turbin angin tipe lainnya dan hanya setengah dari Betz limit (Bhutta dkk. 2012). Oleh karena itu, banyak peneliti telah melakukan

penelitian yang besar untuk meningkatkan koefisien daya rotor Savonius atau memahami mekanisme aliran menggunakan pendekatan yang





berbeda. Penelitian terkait rotor Savonius secara umum dapat diklasifikasikan ke dalam empat kategori seperti disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Fokus penelitian rotor Savonius

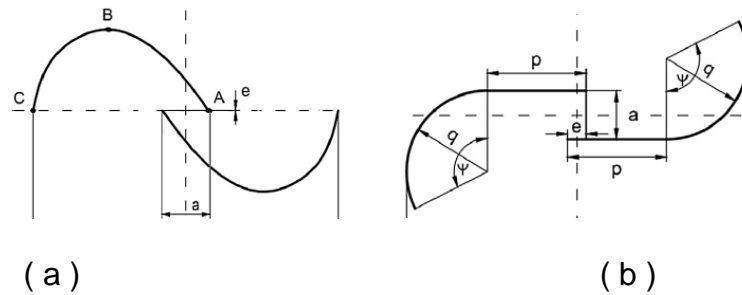
Fokus Penelitian	Bagian yang diinvestigasi	Nomenklatur
Desain geometri rotor	Radius Sudu	$r = d/2$
	Sudut kelengkungan sudu	$\phi$
	Radius rotor	$R = D/2$
	Tinggi Rotor	H
	Jumlah Sudu	Ns
	Radius poros tengah	$a/2$
	Jarak <i>overlap</i>	S
	Rasio <i>overlap</i>	$(S-a)/D$
	Tebal Sudu	BT
	Radius Pelat Ujung	$Do/2$
	Rasio Aspek	$AR = H/D$
	Jumlah tingkat	SN
	Sudut pergeseran fase	PSA
	Profil sudu	-
Peralatan pengarah angin	Curtain arrangement	-
	Outlet diffuser	-
	permukaan tambahan	-
Studi wind farm	Interval rotor	RI
	Susunan rotor	-
Mekanismen medan aliran	Mekanisme penghasil gaya	-
	Fitur aliran rotor	-

Beberapa parameter yang mempengaruhi kinerja rotor Savonius, yaitu: bentuk atau model sudu, parameter desain (jarak *overlap*, jarak antar sudu, sudut kelengkungan, aspek rasio jumlah sudu, jumlah tingkat dll), tambahan komponen atau kelengkapan, *wind effect*, dan susunan turbin.

### 1. Bentuk / Model Sudu

Terdapat beberapa model sudu rotor Savonius yang telah dikembangkan sejauh ini, di mana bentuk yang umum dan dikenal adalah model konvensional yaitu bentuk setengah lingkaran (*semicircular* atau *model*). Namun, beberapa peneliti mengembangkan berbagai model sudu untuk mendapatkan kinerja yang lebih baik dari model konvensional, antara lain tipe *Elliptical* dan tipe *Bach*.





Gambar 13. Bentuk Savonius rotor (a) *Elliptical* type dan (b) *Bach* type (Kacprzak, Liskiewicz, dan Sobczak 2013)

Bentuk lain dari rotor Savonius adalah tipe heliks yang pertama kali dikenalkan tahun 2006 oleh suatu perusahaan bernama “Helix Wind”. Rotor ini memiliki desain yang tidak biasa, yaitu berbentuk heliks. Namun bentuk heliks disini memiliki keuntungan antara lain memiliki getaran yang halus karena variasi torsinya relatif merata untuk setiap sudu, dan juga memiliki torsi yang baik. Tetapi rotor tipe ini memiliki geometri yang relatif rumit, sehingga sulit dalam pembuatan. Beberapa penelitian tentang rotor heliks mengkaji variasi sudut heliks mulai dari  $10^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ , bahkan  $180^\circ$  (Anbarsooz 2016; Damak, Driss, dan Abid 2013b; Saha dan Rajkumar 2006; Zhao et al. 2009)



14. Model sudu helix dengan variasi sudut twist (Lee et al., 2016)

Beberapa peneliti lain mengembangkan model sudu dengan perubahan dari bentuk sudu yang telah ada atau bahkan dengan model baru, antara lain: modifikasi model *classical* (Kamoji, Kedare, dan Prabhu 2011b), *swirling type* (Al-faruk dan Sharifian 2016), *modified Bach type* (Roy dan Saha 2015b), *CC & QM type* (Salyers 2016), Tipe *multiple quarter* (Sharma dan Sharma 2016), *Multi S-Rotor* (ElBeheiry dan El-Askary 2012), *Incurve type* (Driss dkk. 2014), *Slatted atau flip blade* (Reupke dan Probert 1991), *Sail type* (Ghosh dkk. 2009), *Combined blade* (Sanusi dkk. 2016), *Fish-ridged type* (Song, Liu, dan Yang 2015) dan *Banki type* (Wenlong, Baowei, dan Zhaoyong 2014).

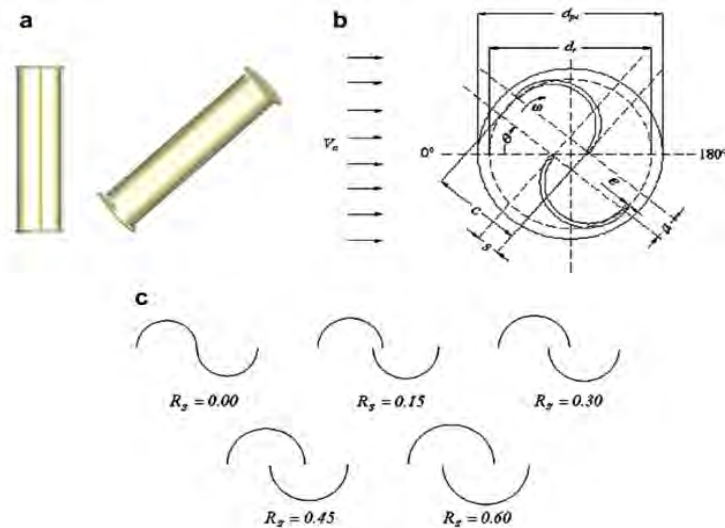
## 2. Parameter Desain

Parameter desain merupakan karakteristik geometri sudu berkaitan dengan ukuran dan dimensi dari sudu Savonius. Beberapa peneliti telah banyak melakukan pengujian dan pengembangan untuk meningkatkan performansi rotor Savonius. Ada beberapa parameter desain yang menentukan performansi dari rotor Savonius, diantaranya adalah: *overlap ratio*, *aspect ratio*, *blade gap*, sudut kelengkungan dll. Adanya *overlap* pada turbin Savonius memungkinkan fluida yang memasuki sisi cekung pada suatu sudu dapat mengalir ke sisi cekung sudu yang lainnya dan dapat menghasilkan tambahan tekanan. Hubungan antara rasio *overlap* dengan koefisien power Turbin Savonius antara lain diteliti oleh Akwa

dengan *overlap ratio*  $R_s$  bervariasi antara 0, 0.15, 0.3, 0.45 dan

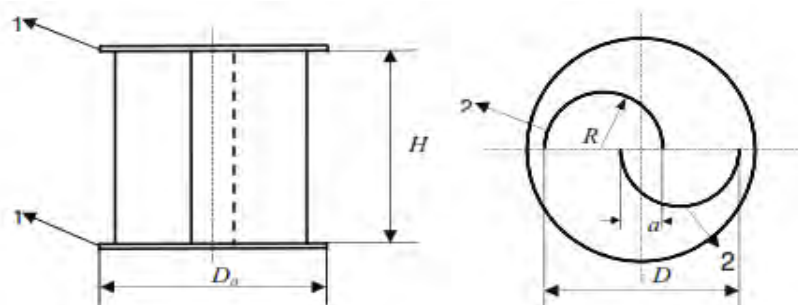


0.6. Diperoleh konfigurasi terbaik adalah  $R_s$  0.15, yang memberikan koefisien daya 0.3161 untuk *tip speed ratio* 1.25.



Gambar 15. Savonius rotor: (a) Model 3D; (b) 2D; dan (c) Variasi *overlap* (Akwa, Gilmar Alves da Silva, dan Petry 2012)

*Aspect ratio* merupakan perbandingan antara tinggi dengan diameter rotor ( $H/D$ ). Kamoji dkk., telah melakukan pengujian dengan variasi tinggi dari sudu dengan nilai *overlap* yang sama, dengan nilai *aspect ratio* 0,6; 0,7; 0,77; dan 1,0. Diperoleh *aspect ratio* 0,7 memiliki  $C_{pmaks}$  sebesar 0,19 pada *tip speed ratio* sebesar 0,72.



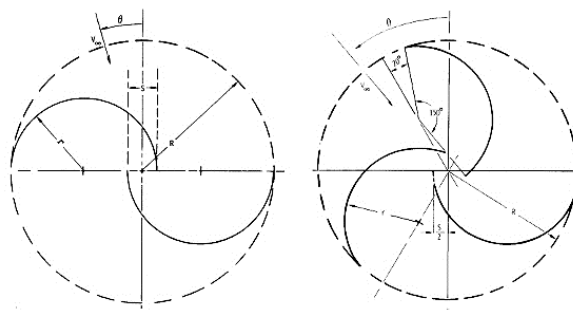
End plates, 2 Rotor blades,  $R$  = Radius of the rotor blade,  $D$  = Diameter of rotor,  $a$  = Overlap distance,  $H$  = Height of the rotor,  $D_o$  = Diameter of the end plate

16. Geometri dengan aspek ratio  $H/D$  (Kamoji, Kedare, dan Prabhu 2011)

Jarak antar sudu (*blade gap*) juga dapat memberikan pengaruh terhadap kinerja Savonius rotor. (Abbaszadeh dan Doroodian 2012) menyajikan investigasi numerik pengaruh jarak antara sudu Savonius dengan bentuk berbeda terhadap kinerjanya. Hasil yang diperoleh membuktikan jarak optimal meningkatkan koefisien momen rotor sebesar 20%. Selain itu, kinerja rotor Savonius dapat dipengaruhi oleh sudut kelengkungan radius sudu. (Mao dan Tian 2015) melakukan investigasi dengan metode *transient CFD*. Hasil menunjukkan bahwa sudut kelengkungan  $160^\circ$  menghasilkan koefisien daya maksimum 0,2836, di mana nilai ini 8.37% lebih besar dari sudu konvensional.

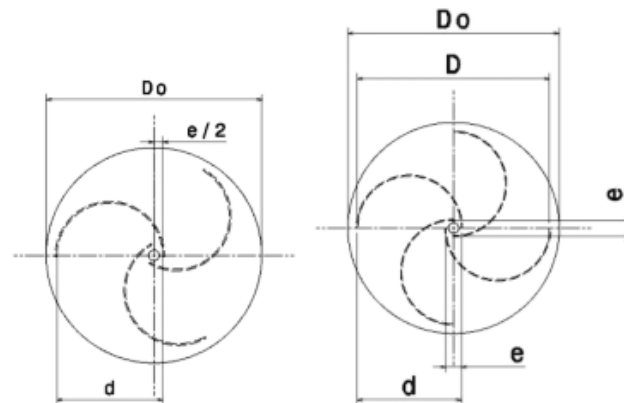
### 3. Jumlah Sudu

Secara umum, rotor Savonius memiliki 2 sudu, namun beberapa penelitian pernah dikembangkan rotor dengan tiga, empat, bahkan lima sudu. Dalam penelitian Blackwell, Sheldahl, & Feltz, (1977) diketahui pengaruh jumlah sudu terhadap koefisien daya sebagai fungsi dari *tip speed ratio*. Model diuji pada *overlap ratio*,  $s/d = 0,15$  pada bilangan *Reynold*  $8,64 \times 10^5$ .



17. Skema 2 buah bucket Savonius rotor  $180^\circ$  dan 3 buah bucket  $150^\circ$  (Blackwell, Sheldahl, dan Feltz 1977)





Gambar 18. Savonius tiga dan empat sudu (Wenehenubun, Saputra, dan Sutanto 2015)

Diperoleh konfigurasi rotor Savonius dengan jumlah 2 sudu lebih unggul dibandingkan dengan rotor dengan jumlah 3 sudu. Namun rotor Savonius dengan tiga sudu atau lebih, cenderung memiliki torsi awal yang baik daripada rotor Savonius dengan dua sudu. (Wenehenubun, Saputra, dan Sutanto 2015).

#### 4. Jumlah Tingkat

Sebuah pengujian terowongan angin dilakukan oleh (Saha, Thotla, dan Maity 2008), untuk melihat kinerja sistem Savonius rotor satu, dua dan tiga tingkat. Konfigurasi dibuat sedemikian rupa sehingga ketiga model yang diuji, aspek rasio-nya sama. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kinerja terbaik diperoleh pada sudu 2 tingkat dengan nilai koefisien daya lebih baik jika dibandingkan dengan rotor satu tingkat dan tiga tingkat.

Dasarkan hasil yang diperoleh Frikha (Frikha dkk. 2016), jumlah tingkat mempengaruhi perilaku aerodinamis dari aliran turbulen di sekitar



rotor Savonius. Bahkan, nilai maksimum kecepatan diperoleh dengan rotor satu, tiga dan empat tingkat. Nilai maksimum tekanan statis diperoleh pada rotor empat tingkat sementara nilai minimum tekanan dinamis diperoleh dengan rotor lima tingkat. Nilai minimum karakteristik turbulen dicatat dengan rotor satu dan dua tingkat, sedangkan nilai maksimum vortisitas diperoleh dengan rotor dua dan lima tingkat. Sementara berdasarkan eksperimen, koefisien torsi dinamis dan koefisien daya meningkat ketika jumlah tingkat juga meningkat.

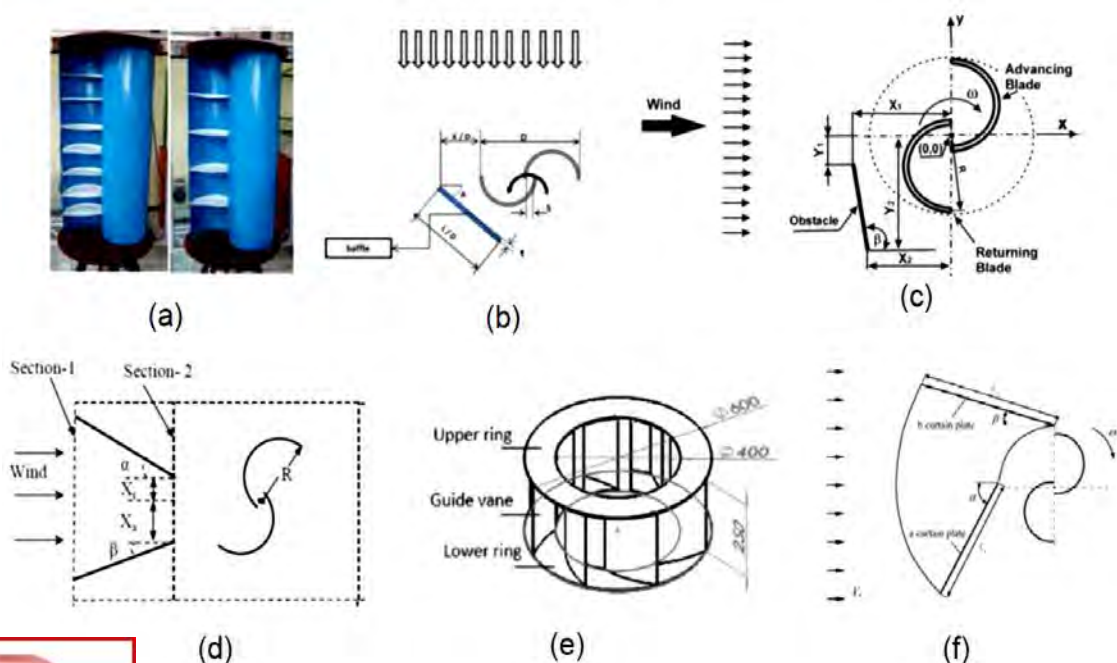
Gambar 19. Savonius rotor satu, dua, dan tiga tingkat (Saha, Thotla, dan Maity 2008).

## 5. Penambahan komponen pengarah

Kinerja turbin angin Savonius dapat ditingkatkan dengan penambahan komponen atau bagian yang diharapkan dapat memberikan kontribusi pada koefisien daya turbin, antara lain berupa penambahan fin dalam sudu (Hasan, Hantoro, dan Nugroho 2013), dan *valve*



*aided* (M.Jaya dan Ujwal K 2006). Selain itu dapat juga dilakukan penambahan *augmentation* atau pengarah sehingga angin dapat terkonsentrasi pada arah yang diharapkan, misalnya dengan *baffle* (El Baz dan Mahmoud 2015), *obstacle* (Mohamed dkk. 2011), *oriented jet* (Roy dan Saha 2014), *wind booster* (Korprasertsak dan Leephakpreeda 2015) dan pemasangan jendela pengarah/*curtain*. *Curtain* yang didesain untuk meningkatkan kinerja dari Savonius rotor yang rendah, dilakukan secara eksperimental dan numerik. Hasil terbaik diperoleh dengan penambahan pengarah, di mana nilai *low static torque* didapat pada pengarah yang pendek, sedangkan peningkatan nilai *static torque* meningkat seiring penambahan *curtain* dengan dimensi lebih panjang. (Altan dan Atilgan, 2012).

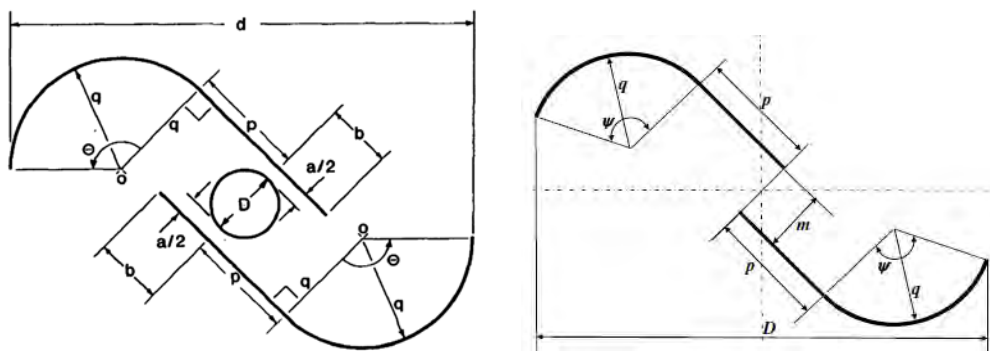


20. Savonius rotor dengan penambahan Penambahan komponen: (a) *fin*, (b) *baffle*, (c) *obstacle*, (d) *oriented jet*, (e) *wind booster*, (f) *curtain*



### G. Sudu Tipe *Bach*

Sudu tipe *Bach* memiliki bentuk sudu yang tidak sepenuhnya melengkung, tetapi ada bagian dengan sudu lurus (Gambar 21). Sejumlah penelitian telah menemukan bahwa rotor tipe *Bach* memiliki kinerja yang lebih baik daripada geometri lainnya. Sejumlah penelitian memodifikasi geometri sudu tipe *Bach* secara eksperimental untuk meningkatkan kinerja tipe *Bach*. Modi dan Fernando, melakukan studi eksperimental dan visualisasi aliran pada pisau tipe *Bach* ini untuk mendapatkan kinerja terbaik pada konfigurasi optimal rotor Savonius yang terkait dengan geometri pisau, dengan ukuran gap ( $a/d$ ) = 0; *blade overlap* ( $b/d$ ) = 0; aspek rasio ( $A$ ) = 0,77; parameter bentuk *blade* ( $p/q$ ) = 0,2; Sudut busur *blade* ( $\phi$ ) = 135°.



Gambar 21. Geometri sudu *Bach* dan parameter – parameternya dengan poros (Modi dan Fernando 1989) dan Modifikasi sudu Savonius tipe *Bach* tanpa poros (Kamoji, Kedare, dan Prabhu 2009)

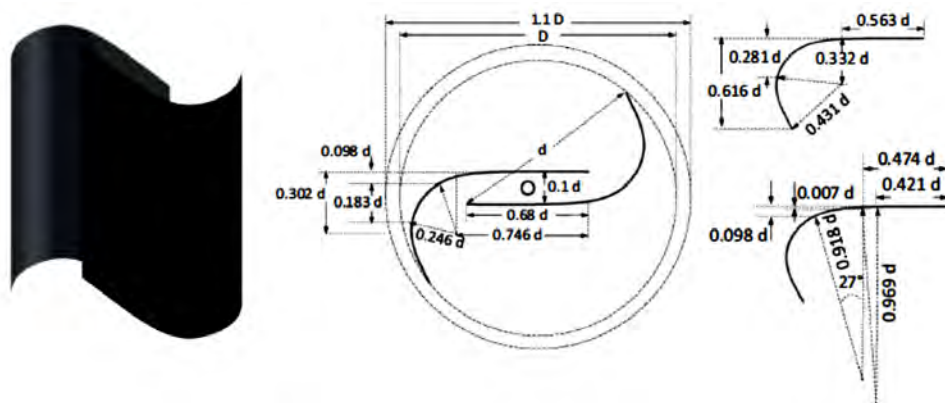
Kamoji dkk melakukan percobaan dengan memodifikasi sudu tipe

tanpa menggunakan poros, di mana  $C_{pmax}$  diperoleh pada pisau



dengan rasio *overlap* 0, sudut kelengkungan sudu  $124^\circ$  dan aspek rasio 0,7, dibandingkan dengan model setengah lingkaran.

Selain itu, Roy dan Saha membandingkan *blade* profil baru dengan tipe *Bach* yang dimodifikasi, pisau semi-sirkular, *blade* semi-eliptik, dan model tipe Benesh untuk menentukan nilai optimum koefisien daya. Hasil yang dioptimalkan memperoleh profil baru, dengan modifikasi pada sudu lengkung (Gambar 20) yang berkinerja lebih baik dengan  $C_{p_{max}}$  0,31 dibandingkan *Bach* yang dimodifikasi, tipe Benesh, semi-eliptik dan semi-circular dengan  $C_p$  berturut-turut 0,3; 0,29; 0,26 dan 0,23.



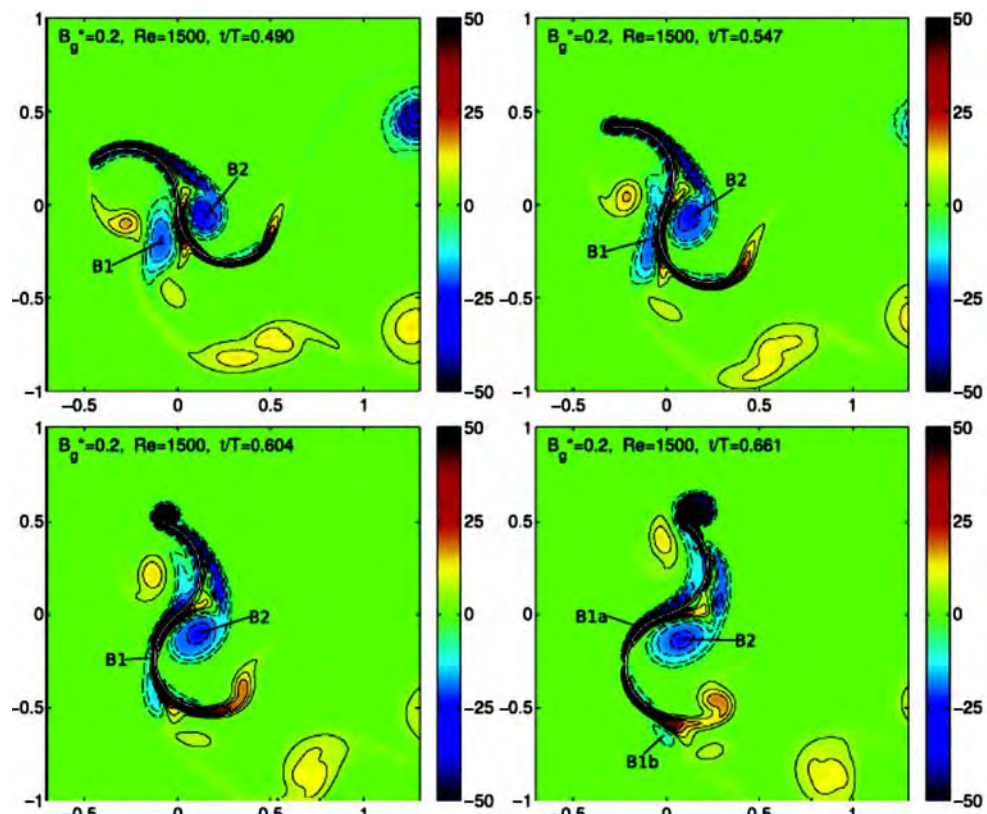
Gambar 22. Modifikasi sudu lengkung Savonius tipe *Bach* (Roy dan Saha 2015)

Pendekatan komputasi juga telah digunakan untuk memprediksi aliran melewati turbin tipe-*Bach* secara efisien dan menghitung koefisien dayanya. Wang dan Yeung, mensimulasikan aliran melewati skala mikro-sumbu angin-sumbu vertikal menggunakan Metode *Discrete-Vortex* viskos untuk digunakan sebagai penghasil energi skala mikro yang dapat

an untuk daya. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa turbin s tipe *Bach* dapat diminiatur menjadi penghasil daya skala mikro



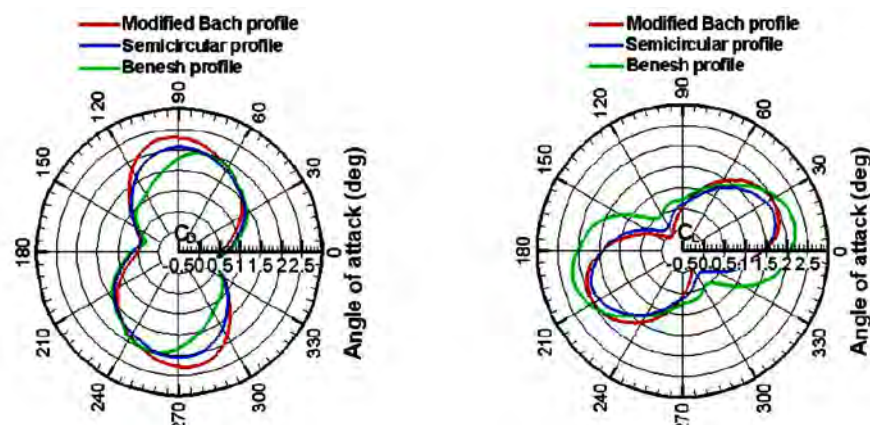
yang memiliki berbagai aplikasi praktis seperti menggerakkan elektronik dari jaringan sensor nirkabel berdaya rendah. Analisis rinci dari penciptaan dan evolusi struktur aliran vortikal dekat sudu turbin serta pengaruh rasio kecepatan pada evolusi aliran diselidiki. Secara khusus, mekanisme *wake-capture* yang meningkatkan kinerja turbin pada bilangan Reynolds rendah ditemukan. Untuk kisaran tertentu dari rasio kecepatan ujung yang ditentukan, pusaran yang terlepas dari ujung sudu *advancing* berdampak pada sisi angin dari sudu *returning*. Vortex tekanan rendah menciptakan efek hisap pada sudu *returning*, menariknya ke arah rotasi.



Gambar 23. Plot kontur Non-dimensional vorticity ( $x=D=U$ ) dari aliran melewati freely-rotating *Bach*-type turbine. Garis kontur Solid menunjukkan vorticity positif; Garis kontur putus – putus menunjukkan vorticity negative (Wang dan Yeung 2016)



Alom dkk., mempelajari aliran fluida di sekitar profil *Bach* dan Benesh yang dimodifikasi dari rotor Savonius menggunakan simulasi numerik CFD untuk menentukan karakteristik *drag* dan *lift* yang bekerja pada rotor. Hasilnya menunjukkan bahwa koefisien *drag* ( $C_D$ ) untuk profil *Bach* yang dimodifikasi lebih tinggi dari profil Benesh.



Gambar 24. Nilai  $C_D$  dan  $C_L$  dari 3 model sudu yang diuji pada  $TSR=0.6$ . (Alom, Borah, dan Ujwal K 2018)

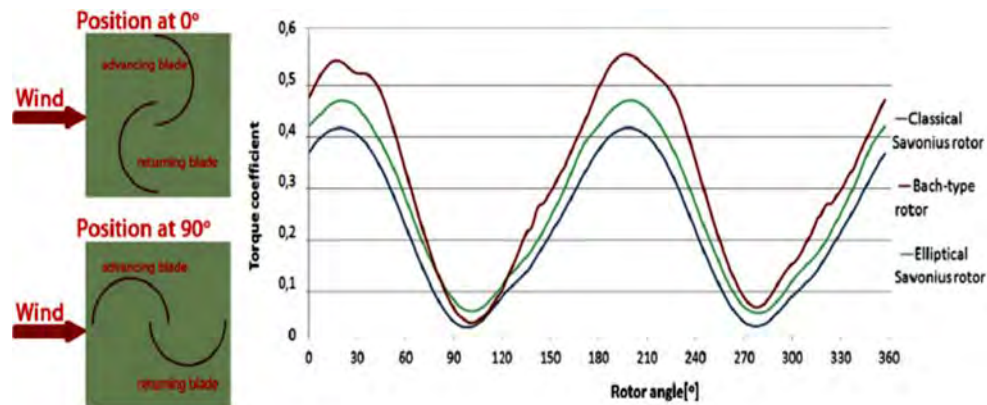
Kacprzak dkk, menganalisis tiga geometri rotor turbin angin Savonius secara numerik (tipe setengah lingkaran, eliptik, dan *Bach*). Dapat dinyatakan bahwa semua rotor mencapai ekstrem pada posisi sudut yang sama. Rotor tipe-*Bach* dalam kondisi angin seperti yang diberikan, menunjukkan karakteristik yang superior dibandingkan dengan geometri *semicircular type* dan *Elliptical type* (gambar 23). Keuntungan ini terutama hadir di dekat torsi maksimum yang di sisi lain, berarti variasi torsi yang lebih besar. Semua geometri mencapai  $C_p$  maksimum pada  $TSR$  0,8. Di wilayah itu, geometri tipe *Bach* menghasilkan output daya tertinggi.

nya, investigasi numerik untuk menilai profil *blade* yang optimal desain *Bach-type blade* yang dimodifikasi telah dilakukan, hasilnya

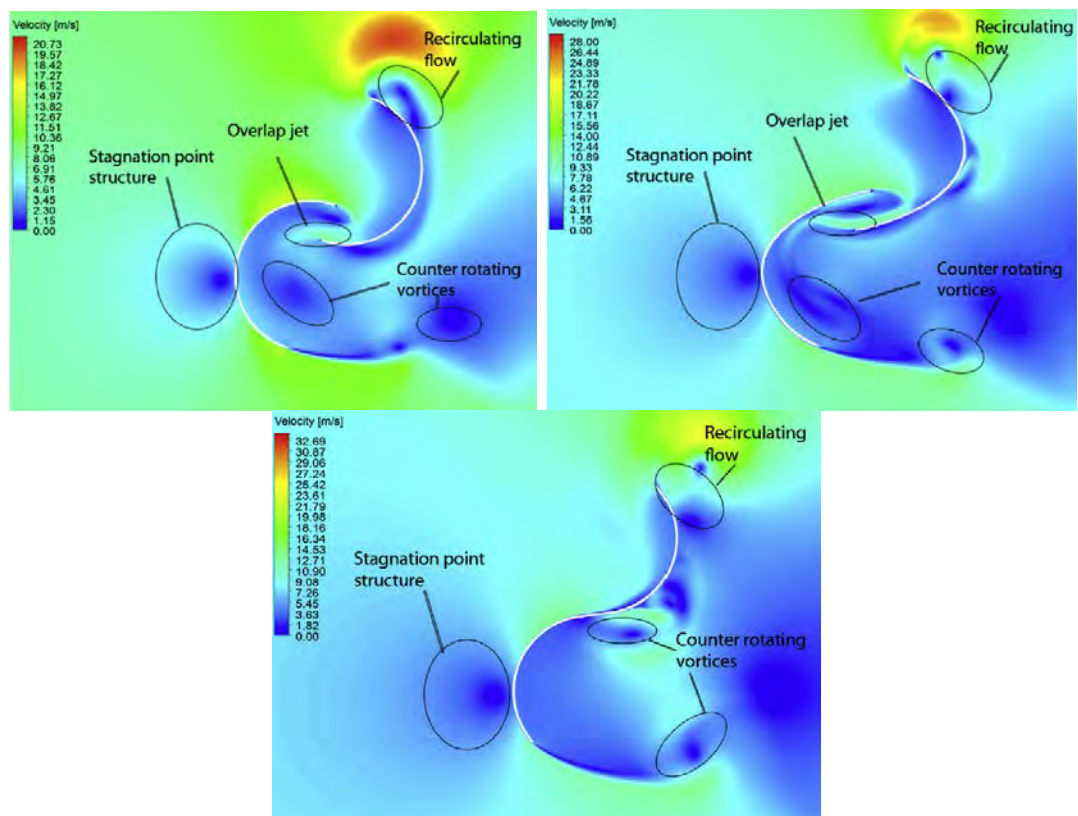




menunjukkan bahwa koefisien daya maksimum dengan sudut kelengkungan sudu  $135^\circ$



Gambar 25. Perbandingan nilai koefisien torsi ( $C_m$ ) pada berbagai posisi sudut rotor pada  $TSR = 0.8$  (Kacprzak, Liskiewicz, dan Sobczak 2013)



26. Distribusi kecepatan pada performa puncak pada  $TSR = 0.8$  : (a). Tipe *semicircular*; (b). Tipe *Elliptical* dan (c). Tipe *Bach* (Kacprzak, Liskiewicz, dan Sobczak 2013)

Gambar 26 menyajikan distribusi kecepatan udara di sekitar turbin pada saat ketika torsi tertinggi tercapai. Plot *streamline* dan vektor tidak ditampilkan karena adanya banyak struktur aliran yang rumit. Oleh karena itu untuk memperjelas, bidang besar perputarannya disajikan. Hal pertama yang dapat diperhatikan untuk semua geometri, adalah zona resirkulasi pada sisi cembung dari sudu *advancing*.

Fenomena lain yang ada pada tipe *Elliptical* dan Savonius Klasik adalah *overlap jet*, yang terbentuk di sisi cekung dari sudu *advancing* dan mempengaruhi sudu kedua. Pertumbuhan kecepatan di daerah ini menunjukkan bahwa kontribusi negatif dari sudu *returning* ke torsi keseluruhan berkurang secara signifikan. Efek ini dikonfirmasi oleh banyak peneliti yang mempelajari pengaruh rasio *overlap* pada kinerja rotor antara lain oleh (Saha, Thotla, dan Maity 2008). Perlu dicatat bahwa dalam kasus rotor elips, *overlap jet* jauh lebih berkembang, yang menjelaskan pengurangan torsi negatif. Selanjutnya, beberapa vortisitas putar balik terlihat. Mereka diinduksi oleh *overlap jet* dan berevolusi menjadi struktur yang lebih besar di bagian hilir rotor, di mana pembentukan vortex berputar balik juga terjadi.

Berdasarkan berbagai penelitian di atas, diperoleh kesimpulan bahwa modifikasi *blade* termasuk terkait sudu lengkung dan sudu lurus dapat meningkatkan kinerja rotor. Tabel 5 merangkum koefisien daya rotor tipe

yang berbeda yang dipelajari oleh berbagai kelompok penelitian.



Tabel 5. Rangkuman beberapa penelitian rotor tipe *Bach*

Peneliti	Metode	H	D	Do	p/q	Arc(°)	RN atau $\frac{RN}{V}$	$C_{Pmax}$
▪ Roy dan Saha, 2015	Test	230	209	230	-	135	$1.2 \times 10^5$	0.3
▪ Kamoji, Kedare, dan Prabhu, 2009	Test	0,7D	-	1,1D	0.2	124	$1.5 \times 10^5$	0.21
▪ Modi dan Fernando, 1989	Test	0.77 D	-	0,75 D	0.2	135	6.76 m/s	0.36
▪ V. J. Modi, M. S. U. K. Fernando, dan N. J. Roth, 1990	Test	0.77 D	-	1,1D	0.2	135	7 m/s	0.32
▪ Roy dan Saha, 2013	CFD	-	-	-	-	135	6.31 m/s	0.34
▪ Zhou dan Rempfer, 2013	CFD	-	290	-	0.2	124	7.924 m/s	0.263
▪ Kacprzak, Liskiewicz, dan Sobczak, 2013	CFD	-	200	266	0.2	135	-	0.18
▪ K Kacprzak dan Sobczak, 2014	CFD	154	200		0.2	135	9 m/s	0.215

Tinjauan pustaka yang dilaporkan menyajikan bahwa perubahan dalam desain geometri pisau turbin angin Savonius dapat meningkatkan koefisien daya. Banyak penyempurnaan desain Inventif telah dilakukan pada sudu tipe *Bach*, tetapi modifikasi paling sederhana adalah memodifikasi bentuk sudu.

Sebagian besar hasil penelitian sebelumnya dilakukan pada modifikasi sudu lengkung, berkaitan dengan sudut busur sudu untuk peningkatan efisiensi, tetapi efek sudut sudu pada pertemuan sudu lengkung dan sudu lurus pada kinerja rotor belum diselidiki sejauh ini. Bagian Sudu lurus ini berkontribusi untuk pergerakan aliran udara selanjutnya setelah melewati bagian sudu lengkung (dari sudu *advancing*), yang mengarah ke area *overlap* yang berpotensi mengurangi torsi negatif dari sudu *returning*.

ini dapat diteliti lebih lanjut dengan modifikasi pada bagian sudu



lurus (*straight blade*) untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja turbin angin Savonius.

## H. Simulasi Numerik CFD

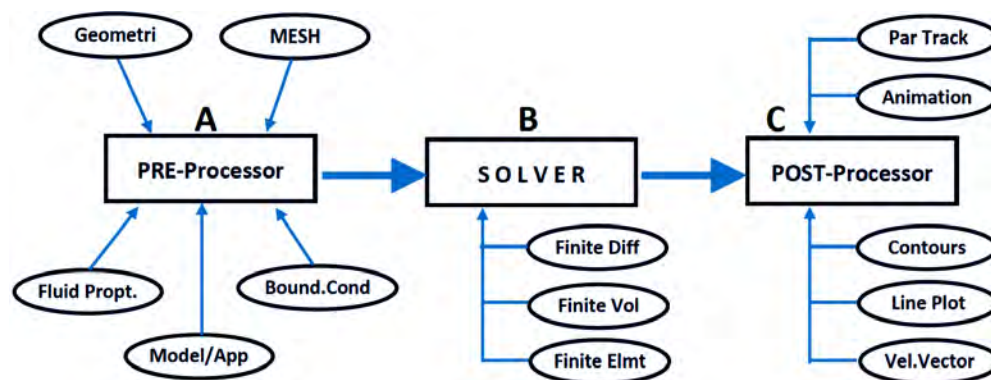
Komputasi fluida dinamis atau *Computational fluid dynamics* (CFD) merupakan teknologi komputasi yang memungkinkan untuk mempelajari dinamika dari benda – benda atau zat – zat yang mengalir. Dengan perangkat ini, dapat diprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan – persamaan matematika (model matematika). Pada dasarnya, persamaan – persamaan pada fluida dibangun dan dianalisis berdasarkan persamaan – persamaan diferensial parsial yang merepresentasikan hukum – hukum konservasi massa, momentum dan energi.

Simulasi menggunakan CFD menghasilkan parameter-parameter penting seperti tekanan, suhu, kecepatan, dan laju alir massa (mass flow rate). Analisa menggunakan CFD diperlukan pemahaman dan pengetahuan dasar bidang mekanika fluida untuk interpretasi hasil-hasil simulasi. Penyederhanaan CFD terdiri dari tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu *preprocessing* (spesifikasi geometri, pemilihan turbulence model, spesifikasi parameter dan grid generation), *solving* dan terakhir *postprocessing* (*visualization* dan *treatment* data). Prosedur CFD

ahapan seperti diagram pada gambar 23.







Gambar 27. Struktur Simulasi Numerik

Simulasi CFD dikombinasikan dengan studi eksperimental memberikan hasil yang cukup informatif untuk penelitian VAWT. Pendekatan CFD adalah metode yang tidak mahal untuk memprediksi kinerja sebelum membuat model. Selain itu, dapat memainkan peran penting dalam mengidentifikasi parameter desain yang optimal. Menurut Islam et al., (2008), model numerik terbaik yang divalidasi untuk perhitungan VAWT dapat dibagi ke dalam tiga kategori. Ketiga kategori tersebut adalah model momentum, model vortex, dan model cascade. Masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan tertentu, tetapi disimpulkan bahwa model *cascade* memberikan konvergensi yang halus pada rasio *tip speed ratio* yang lebih tinggi dengan akurasi yang wajar. Untuk rotor *drag-type*, Pope et al., (2011) mempresentasikan korelasi baru untuk analisis kinerja. Korelasinya memprediksi koefisien daya dalam term bilangan tak berdimensi dan geometri turbin spesifik. Korelasi yang kuat

s ke berbagai geometri rotor. Teknik CFD ini terbukti menjadi alat yang berguna untuk meningkatkan kinerja turbin Savonius. Alaimo



et al.,(2015) menyelesaikan analisis VAWT dengan komputasi fluida dinamika (CFD) menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent software, dengan membandingkan kinerja turbin bentuk lurus dan heliks. Digunakan pendekatan dua dimensi dan tiga dimensi untuk memecahkan persamaan Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS). Simulasi dua dimensi digunakan untuk memperkirakan parameter kinerja seperti torsi, daya, angkat, dan koefisien *drag*. Simulasi tiga dimensi lebih lanjut dapat dilakukan untuk penentuan sifat aerodinamis yang lebih akurat dari geometri kompleks yang terkait dengan heliks, untuk mendapatkan hasil numerik secara statis dan dinamis. Selain itu, akurasi dan kelayakan pendekatan CFD yang berbeda untuk investigasi VAWT juga dijelaskan. Elemen tetrahedral digunakan untuk mengkarakterisasi mesh, dan model solusi diatur menggunakan *least-squares cell-based option* dengan *second order interpolation* untuk *face pressure*. Model turbulensi realizable k-epsilon adalah dua model turbulensi persamaan yang disarankan untuk memperhitungkan rotasi dan regangan dalam aliran (Sagol, Reggio, dan Ilinca 2012) .Untuk simulasi dinamis, solusi kerangka acuan bergerak harus berfungsi sebagai kondisi awal untuk perhitungan sliding mesh (*FLUENT Manual* 2012).

