

TUGAS AKHIR - TM184835

STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN SAVONIUS TIPE BACH DENGAN VARIASI SUDUT BUSUR SUDU DAN KECEPATAN PUTAR

Adima Nabila Rahmah
NRP. 02111640000036

Dosen Pembimbing
Vivien Suphandani, ST, ME, PhD
NIP. 198105292003122001

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020



TUGAS AKHIR (KONVERSI ENERGI)-TM184835

STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN SAVONIUS TIPE BACH DENGAN VARIASI SUDUT BUSUR SUDU DAN KECEPATAN PUTAR

ADIMA NABILA RAHMAH
NRP. 0211164000036

Dosen Pembimbing:
Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman Sengaja Dikосongkan)



FINAL PROJECT (ENERGY CONVERSION)-TM184835

***NUMERICAL STUDY OF SAVONIUS WIND TURBINE
BACH TYPE WITH ANGLE VARIATIONS OF BLADE AND
ROTATING SPEED***

ADIMA NABILA RAHMAH
NRP. 0211164000036

Advisor:
Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial and System Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020

(Halaman Sengaja Dikosongkan)

HALAMAN PENGESAHAN
STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN SAVONIUS TIPE
BACH DENGAN VARIASI SUDUT BUSUR SUDU DAN
KECEPATAN PUTAR

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ADIMA NABILA RAHMAH

NRP. 02111640000036

Disetujui oleh:

Vivien Suphandani, ST, ME,

PhD

NIP.198105292003122001



(Pembimbing)

Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono,

DEA

NIP.196001291987011001



(Penguji I)

Nur Ikhwan, ST, M.Eng.

NIP.196709151995121001



(Penguji II)

Prof.Dr.Ing. Herman

Sasongko

NIP.196010041986011001



(Penguji III)



(Halaman Sengaja Dikosongkan)

STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN SAVONIUS TIPE BACH DENGAN VARIASI SUDUT BUSUR SUDU DAN KECEPATAN PUTAR

Nama Mahasiswa : Adima Nabila Rahmah
NRP : 0211164000036
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.

Abstrak:

Energi memiliki peran penting dan tidak dapat dilepaskan dalam kehidupan manusia. Terlebih, saat ini hampir semua aktivitas manusia sangat tergantung pada energi. Mulai dari aktivitas rumah tangga, alat pendukung seperti alat penerangan, sektor industri, transportasi dan komersil dapat difungsikan jika ada energi. Dari sekian banyak aktivitas tersebut, masih banyak yang menggunakan energi yang tidak terbarukan atau energi yang ketersediaannya di alam sangat terbatas. Untuk mengatasi hal tersebut perlu dikembangkan studi penelitian tentang energi terbarukan agar bisa memenuhi kebutuhan energi, salah satu energi terbarukan yang bisa dimanfaatkan dan dikembangkan adalah energi angin. Turbin angin Savonius merupakan turbin angin vertikal yang mempunyai bentuk setengah silinder yang dipasang dengan arah berlawanan. Konstruksi turbin Savonius yang dianalisa adalah bentuk Bach, beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa bentuk Bach dapat menghasilkan performa yang sama ataupun lebih baik dibandingkan dengan turbin Savonius standard. Dalam penelitian ini dilakukan analisis terhadap sudut busur sudu yang dapat memberikan performa paling optimal.

Metode yang dilakukan pada studi ini adalah studi numerik dua dimensi pada turbin dengan aliran unsteady dan incompressible yang menggunakan software ANSYS Fluent. Bentuk geometri yang diuji adalah turbin angin Savonius sudu

Bach dengan variasi sudut busur turbin 124⁰, 130⁰, dan 135⁰ dengan kondisi rotor bergerak atau dinamis. Turbulence model yang digunakan adalah turbulence model viscous k- ω SST. Variasi kecepatan inlet yang digunakan adalah 4 m/s. Boundary condition untuk inlet adalah velocity inlet, outlet adalah outflow, dinding atas bawah diatur symmetry dan selainnya adalah wall. Pengolahan data akan dilakukan setelah simulasi selesai. Data tersebut meliputi kontur kecepatan dan tekanan, distribusi koefisien tekanan sepanjang permukaan, torsi, koefisien daya dan koefisien torsi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kecepatan 4 m/s dengan kondisi turbin berputar, turbin angin Savonius tipe Bach dengan sudut busur sudu 135 memiliki koefisien torsi lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Savonius tipe Bach dengan sudut busur sudu 124 dan 130. Begitu juga dengan koefisien power yang dihasilkan dari ketiga jenis turbin tersebut, didapatkan bahwa turbin angin Savonius tipe Bach dengan sudut busur sudu 135 memiliki hasil yang lebih tinggi.

Kata Kunci : Savonius, Bach, Torsi, Koefisien Torsi, dan Koefisien Daya

**NUMERICAL STUDY OF SAVONIUS WIND TURBINE
BACH TYPE WITH ANGLE VARIATIONS OF BLADE
AND ROTATING SPEED**

Name : Adima Nabila Rahmah
NRP : 0211164000036
Department : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Academic Supervisor : Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.

Abstract:

Energy has an important role and cannot be released in human life. Nowadays almost all human activities very dependant on energy. Starting from household activities, industrial, transportation, and commercial sectors can be used if there is energy. All of these activities, there are still many who use non-renewable energy, which is very limited in nature. To overcome this, it is necessary to develop research studies on renewable in order to meet energy needs. One of the renewable energy sources that can be utilized and developed is wind energy. Savonius wind turbines is wind turbine with vertical rotor that have a half cylinder shape and paired to opposite direction. The construction for analysing is Bach typed, some previous studies have shown that the Bach type can produce the same or better performance compared to the standard Savonius wind turbine. In this study an analysis of the angle of the blade that can be provide the most optimal performance.

The method used in this study is two-dimensional numerical study, with unsteady turbine and incompressible flow using ANSYS Fluent. The turbine is tested with variations angle of blade which are 124^0 , 130^0 and 135^0 which condition of rotor is moving or dynamic. The turbulence model used is turbulence model viscous $k-\omega$ SST. The variation inlet speed used is 4m/s. Boundary condition for inlet is velocity inlet, outlet is outflow, upper and lower walls are arranged symmetry and beside that are walls. Data processing will be done after the simulation is complete. The data includes velocity and pressure contours,

distribution of pressure coefficient along the surface of the turbine, drag coefficient and torque of coefficient.

The results showed that at a speed of 4m/s with rotating turbine conditions, the Savonius wind turbine Bach type with 135⁰ blade arc angle has a higher torque coefficient compared to the 124⁰ and 130⁰ blade arc angle of Savonius wind turbine Bach type. Likewise the power coefficient, it was found that the Savonius wind turbine Bach type with 135⁰ blade arc angle has a higher results.

Key Words: Savonius, Bach, Dynamic Torque Coefficient, Coefficient of Drag.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan kasih dan rahmat kepada penulis yang dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul: “ **Studi Numerik Turbin Angin Savonius Tipe Bach dengan Variasi Sudut Busur Sudu dan Kecepatan Putar.** “ Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan Pendidikan Sarjana Teknik S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Dalam kesempatan ini, secara khusus penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT, tuhan semesta alam yang selalu senantiasa memberikan rahmat dan hidayahnya. Shalawat serta salam kepada junjungan besar Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi panutan kehidupan bagi umat manusia.
2. Bapak Rahmad Basuki dan Ibu Uswatun Chasanah selaku ayah dan ibu penulis yang selalu sabar dalam membimbing penulis, dan selalu memberikan wejangan agar penulis segera menyelesaikan tugas akhirnya.
3. Ibu Vivien Suphandani, ST, ME, PhD. Selaku dosen pembimbing yang sabar dan selalu membimbing penulis dalam penyusunan tugas akhir.
4. Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT. Selaku dosen wali penulis dari mahasiswa baru hingga sampai saat ini yang selalu memberikan masukan ketika masuk semester baru.
5. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA, Nur Ikhwan, ST, M.Eng. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko. Selaku dosen penguji tugas akhir kali ini yang memberikan banyak informasi, saran dan masukan yang sangat berguna bagi penulisan tugas akhir ini dan masa depan bagi penulis.
6. Seluruh Dosen dan Karyawan Teknik Mesin FTIRS. Terima kasih banyak.

7. Hasnatiwi Karina Fajri dan Kelvin Ibrahim selaku teman penulis yang selalu membantu penulis dalam pengerjaan tugas akhir ini.
8. Safirranika Mulya Nova, selaku teman penulis dari mahasiswa baru hingga saat ini, yang selalu sabar, baik hati, dan memberikan masukan terkait kehidupan akademis penulis maupun non-akademis.
9. Angkatan M59 dimana angkatan penulis yang solid.
10. OC Acara 2017, terima kasih atas kenangan dalam satu semester pada saat itu.
11. Teman-teman Hubungan Luar HMM 2017-2019, terima kasih telah mendengar keluh kesah penulis pada saat penat di kegiatan akademis.
12. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya selaku kampus tempat penulis mengemban ilmu.

Akhir kata dari penulis, kurang lebihnya mohon maaf yang sebesar-besarnya.

Surabaya, 07 Agustus 2020
Penulis

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxiii
BAB I.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
BAB II.....	7
2.1 Turbin Angin.....	7
2.2 Turbin Angin Savonius.....	9
2.3 Drag.....	11
2.4 Coefficient of Power (C_p).....	13
2.5 Coefficient of Torque (C_t).....	13
2.6 Coefficient of Static Torque (C_{ts}).....	14
2.7 Teori Betz.....	14
2.8 Momentum Angular.....	19
2.9 Dynamic Torque.....	21
2.10 Penelitian Terdahulu.....	22
2.10.1 Akwa er al. (2012).....	22
2.10.2 Kamoji et al. (2009).....	25

2.10.3	K. Kacprzak et al. (2013)	31
2.10.4	Zharfan (2019)	37
BAB III	45
3.1	Variasi dan Domain Simulasi	45
3.1.1	Variasi	45
3.1.2	Domain Simulasi	46
3.2	Tahap Pre-Processing	46
3.2.1	Pembuatan Geometri dan Meshing	46
3.2.2	Boundary Condition	49
3.2.3	<i>Solver</i>	50
3.2.3.1	<i>General</i>	50
3.2.3.2	<i>Models</i>	50
3.2.3.3	<i>Material</i>	50
3.2.3.4	<i>Cell Zone Condition</i>	50
3.2.3.5	<i>Boundary Condition</i>	51
3.2.3.6	<i>Solution</i>	51
3.2.3.7	<i>Initialize</i>	51
3.2.3.8	<i>Residual</i>	51
3.2.3.9	<i>Run Calculation</i>	51
3.3	<i>Tahap Processing</i>	52
3.4	<i>Tahap Post Processing</i>	53
3.4.1	Perhitungan Bilangan Reynolds	53
3.5	<i>Grid Independence Test</i>	53
3.6	Flowchart	55

BAB IV	59
4.1 Kontur Dimensionless Velocity (V/V_{∞}).....	59
4.2 Kontur Koefisien Tekanan (C_p)	62
4.3 Distribusi Koefisien Tekanan	65
4.3 Koefisien Torsi VS Tip Speed Ratio	67
4.4 Koefisien Power VS Tip Speed Ratio.....	68
4.5 Koefisien Torsi VS Sudut Putar	69
4.6 Komparasi Dengan Penelitian Terdahulu	70
4.6.1 Komparasi Dengan Penelitian Kacprzak (2014)	70
4.6.2 Komparasi Dengan Penelitian Zharfan (2019) .	71
BAB V	73
5.1 Kesimpulan	73
5.2 Saran	74
DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN	77

(Halaman Sengaja Dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema Turbin Angin Savonius	9
Gambar 2. 2 Pola Aliran Pada Turbin Angin Savonius	10
Gambar 2. 3 Gaya-gaya disekeliling fluida dalam penampang benda 2 dimensi (a) Pressure Force (b) Viscous Force (c) Resultant Force (Munson et al, 2013).....	11
Gambar 2. 4 Kondisi Aliran Udara, Variasi Tekanan, dan Kecepatan Pada Model Ideal Turbin Angin (Ragheb, 2017).....	16
Gambar 2. 5 Skema rotor Savonius (a) gambar 2D (b) gambar 3D (c) Flow pattern di rotor (Akwa et al, 2012).....	23
Gambar 2. 6 Pengaruh Reynolds Number Terhadap Coefficient Of Moment (Akwa et al, 2012).....	25
Gambar 2. 7 Diagram skema alat eksperimen (Kamoji et al, 2009)	26
Gambar 2. 8 Diagram skema rotor Savonius yang diuji (Kamoji et al, 2009)	27
Gambar 2. 9 Grafik pengaruh sudut busur dan tip speed ratio terhadap C_p (Kamoji et al, 2009)	28
Gambar 2. 10 Grafik pengaruh sudut busur turbin dan tip speed ratio terhadap C_t (Kamoji et al, 2009)	28
Gambar 2. 11 Grafik pengaruh sudut busur turbin dan posisi rotor terhadap C_t (Kamoji et al, 2009)	29
Gambar 2. 12 Grafik pengaruh sudut busur turbin dan tip speed ratio terhadap C_p (Kamoji et al,2009)	29
Gambar 2. 13 Grafik pengaruh sudut busur turbin dan tip speed ratio terhadap C_t (Kamoji et al, 2009)	30
Gambar 2. 14 Grafik pengaruh sudut busur turbin dan posisi rotor terhadap C_t (Kamoji et al, 2009)	30
Gambar 2. 15 Skema turbin angin Savonius konvensional (K. Kacprzak et al, 2013)	31
Gambar 2. 16 Skema turbin angin Savonius tipe Bach (K. Kacprzak, 2013)	32

Gambar 2. 17 Skema turbin angin Savonius tipe eliptik (K. Kacprzak et al, 2013)	33
Gambar 2. 18 Susunan domain simulasi (K. Kacprzak et al, 2013)	35
Gambar 2. 19 Grafik perbandingan C_p hasil simulasi dengan eksperimen (K. Kacprzak et al. 2013)	35
Gambar 2. 20 Perbandingan antara hasil simulasi model turbulen dan model transisi (K. Kacprzak et al. 2013)	36
Gambar 2. 21 Kontur Dimensionless Velocity (V/V_∞) pada variasi kecepatan $V = 7$ m/s	38
Gambar 2. 22 Kontur Dimensionless Velocity (V/V_∞) pada variasi kecepatan $V = 4$ m/s	39
Gambar 2. 23 Kontur koefisien tekanan pada variasi kecepatan 7 m/s	41
Gambar 2. 24 Kontur koefisien tekanan pada variasi kecepatan 4 m/s	42
Gambar 2. 25 Grafik perbandingan koefisien torsi statis pada $V = 7$ m/s	43
Gambar 2. 26 Grafik perbandingan koefisien torsi statis pada $V = 4$ m/s	43
Gambar 3. 1 Geometri Turbin Angin Savonius Tipe Bach	
47	
Gambar 3. 2 Meshing Pada Blade	48
Gambar 3. 3 Meshing Pada Benda Uji	49
Gambar 3. 4 Boundary Condition Penelitian	50
Gambar 3. 5 Flowchart Penelitian	55
Gambar 3. 6 Flowchart Simulasi Numerik	57
Gambar 4. 1 Kontour Dimensionless Velocity (V/V_∞)	61
Gambar 4. 2 Kontour Koefisien Tekanan	64
Gambar 4. 3 Distribusi Koefisien Tekanan Sepanjang Permukaan $\Theta = 20^\circ$	65
Gambar 4. 4 Koefisien Torsi vs Tip Speed Ratio	67

Gambar 4. 5 Koefisien Power vs Tip Speed Ratio	68
Gambar 4. 6 Koefisien Torsi VS Sudut Putar	69
Gambar 4. 7 Penelitian Kacprzak (2014) dengan Peneliti Sekarang (2020).....	70
Gambar 4. 8 Grafik Komparasi Koefisien Torsi Statis Zharfan (2019) dengan Koefisien Torsi Dinamis Penelitian Sekarang (2020).....	72

(Halaman Sengaja Dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai coefficient drag untuk beberapa bentuk benda (White, 2010).....	12
Tabel 2. 2 Nilai konfigurasi rotor Savonius untuk eksperimen (Kamoji et al, 2009).....	27
Tabel 2. 3 Nilai konfigurasi rotor Savonius untuk eksperimen (K. Kacprzak et al, 2013)	34
Tabel 3. 1 Variasi Penelitian	45
Tabel 3. 2 Variasi Tip Speed Ratio	52
Tabel 3. 3 Grid Independence Test Turbin Savonius Tipe Bach dengan variasi sudut busur turbin 135^0	54
Tabel 4. 1 Tabel Koefisien Drag Pada Turbin Angin Savonius Tipe Bach pada posisi $\Theta=20^0$	66

(Halaman Sengaja Dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi memiliki peran penting dan tidak dapat dilepaskan dalam kehidupan manusia Terlebih, saat ini hampir semua aktivitas manusia sangat tergantung pada energi. Mulai dari aktivitas rumah tangga, alat pendukung seperti alat penerangan, sektor industri, transportasi dan komersil dapat difungsikan jika ada energi. Dari sekian banyak aktivitas tersebut, masih banyak yang menggunakan energi yang tidak terbarukan atau energi yang ketersediaan di alam sangat terbatas. Menurut *Outlook Energi Indonesia 2019*, Total konsumsi energi final (tanpa biomasa tradisional) tahun 2018 sekitar 114 MTOE terdiri dari sektor transportasi 40%, kemudian industri 36%, rumah tangga 16%, komersial dan sektor lainnya masing-masing 6% dan 2%. Dari data tersebut tentunya akan semakin meningkat seiringnya dengan peningkatan jumlah populasi. Sebagai contoh, cadangan minyak terbukti Indonesia terus menurun dari tahun 1995 dengan nilai 5.9 miliar barel menjadi 3.7 miliar barel pada tahun 2015. Penggunaan energi fosil yang besar ini dapat menimbulkan masalah pada lingkungan dan sumber daya energi yang lain. Permasalahan ini dapat diatasi dengan penggantian dari energi tidak terbarukan dengan menggunakan energi terbarukan. Energi terbarukan yang bisa dikembangkan dan dimanfaatkan adalah energi angin.

Dari data *Outlook Energi Indonesia 2019*, Total potensi energi terbarukan ekuivalen adalah 442 GW dan untuk energi angin sendiri menyumbang potensi sebesar 60,6 GW. Menurut data Statistik EBTKE tahun 2014, di beberapa wilayah di Indonesia, seperti di pulau Jawa dan Sulawesi, potensi energi angin mencapai 970 MW. Pemanfaatan potensi tersebut masih sangat minim sekali. Menurut Statistik EBTKE tahun 2013, pemanfaatan potensi angin di Indonesia masih ada di angka 1.96 MW. Rendahnya pemanfaatan energi angin ini diakibatkan oleh tingginya biaya

pembuatan turbin angin horizontal dan keterbatasan dalam penempatan turbin angin horizontal ini. Di Indonesia sendiri, kecepatan angin yang relatif rendah pada rentang 4 – 5 m/s membuat daerah-daerah di Indonesia membutuhkan turbin angin dengan kemampuan *self starting* yang baik.

Jenis turbin angin dengan konstruksi yang tidak rumit dan tidak memerlukan biaya yang mahal yaitu turbin angin Savonius. Turbin angin Savonius adalah turbin angin dengan poros vertical yang mempunyai bentuk setengah silinder yang dipasang dengan arah yang berlawanan. Turbin angin Savonius memanfaatkan selisih dari gaya drag yang bekerja pada setiap sudutnya yang akan menghasilkan torsi. Torsi ini bisa dikalikan dengan kecepatan angular dari turbin untuk mendapatkan daya turbin. Semakin besar selisih gaya drag maka akan semakin besar pula daya yang dihasilkan oleh turbin. Turbin angin ini juga memiliki kecepatan startup yang rendah sehingga cocok digunakan di Indonesia yang memiliki daerah dengan kecepatan angin yang relatif rendah. Kekurangan dari turbin angin ini sendiri adalah memiliki nilai efisiensi yang rendah, sehingga banyak penelitian dilakukan dengan cara modifikasi bentuk dari sudu turbin.

Penelitian yang dilakukan **Akwa et al (2012)**, mendapatkan hasil berupa pengaruh dari beberapa parameter parameter geometri pada turbin angin Savonius. Parameter geometri tersebut adalah *end plates*, *aspect ratio*, *overlap* dan *bucket spacing*, jumlah *buckets* dan tingkatan rotor, *buckets* dan bentuk rotor, pemasangan poros atau aksesoris lain, Reynolds *number* dan *turbulence intensity*, dan pengaruh stator terhadap performa dari turbin angin Savonius.

Penelitian lain mengenai modifikasi bentuk dari sudu turbin Savonius dilakukan oleh **Kamoji et al (2008)**. Pada penelitian ini dilakukan studi eksperimen pengaruh dari sudut busur turbin Bach dan juga Reynolds *number* terhadap *coefficient of power*, yang dibandingkan dengan *coefficient of power* turbin

Savonius konvensional. Hasil dari studi ini didapatkan bahwa nilai optimal *coefficient of power* sebesar 0.21 diperoleh pada nilai Reynolds number 150,000 dan sudut busur turbin Bach 124° .

Penelitian lain mengenai modifikasi bentuk dari sudu turbin Savonius juga pernah dilakukan oleh **K. Kacprzak et al (2013)**. Pada penelitian ini dilakukan studi simulasi dua dimensi pengaruh dari bentuk sudu turbin terhadap *coefficient of power* dan *coefficient of torque* dengan metode ANSYS CFX. Turbin yang diteliti adalah turbin Savonius konvensional, turbin Savonius tipe Bach dengan sudut busur turbin 135° , dan turbin Savonius tipe eliptik. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan nilai *coefficient of power* paling tinggi didapat pada turbin Savonius tipe Bach dengan nilai 0.18, diikuti tipe eliptik dengan nilai 0.17, lalu tipe konvensional dengan nilai 0.15. Nilai *coefficient of torque* tertinggi didapat pada turbin Savonius tipe eliptik dengan nilai 0.30, diikuti tipe Bach dengan nilai 0.27, lalu tipe konvensional dengan nilai 0.26.

Pada penelitian yang dilakukan oleh **Zharfan (2019)** mengenai studi numerik Turbin Savonius tipe standar dan tipe sudu Bach dengan variasi sudut busur sebesar 124° dan 135° pada kecepatan konstan 4 dan 7 m/s. Penelitian ini menggunakan software ANSYS FLUENT dan dilakukan dengan kondisi turbin diam atau statis. Hasil dari penelitian ini adalah pada kecepatan 4 dan 7 m/s dengan kondisi turbin tidak berputar, turbin tipe Bach memiliki koefisien torsi statis lebih tinggi dibandingkan dengan turbin Savonius standar. Pada sudut putar 150° dimana koefisien momen minimum, nilai koefisien masing-masing bentuk tidak terlalu berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan sudu Bach tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan *self starting* turbin, bila dibandingkan dengan sudu standar.

Dari penelitian-penelitian sebelumnya, belum dilakukan penelitian dengan memvariasikan bentuk sudu turbin Bach dari sisi

sudut busur turbin dengan metode simulasi ANSYS FLUENT terutama pada kecepatan rendah. Pada penelitian ini akan dilakukan perbandingan turbin angin Savonius tipe Bach dengan modifikasi sudut busur sudu sebesar 124^0 , 130^0 dan 135^0 pada kecepatan 4 m/s dengan kondisi turbin dinamis atau berputar.

1.2 Rumusan Masalah

Salah satu kekurangan pada turbin angin Savonius adalah nilai efisiensi yang rendah. Cara untuk meningkatkan efisiensi pada turbin angin Savonius adalah dengan modifikasi bentuk sudu turbin, dengan menggunakan sudu tipe Bach dengan sudut busur 124^0 , 130^0 dan 135^0 tanpa adanya *overlap*. Modifikasi ini akan membuat performa dari turbin angin Savonius naik. Hipotesa awal pada penelitian ini ialah :

1. Turbin angin Savonius tipe Bach memiliki bentuk sudu turbin yang tidak setengah lingkaran, tidak seperti dengan turbin angin Savonius standar. Hal ini menyebabkan area *wake* yang terbentuk pada turbin angin Savonius tipe Bach baik pada sudu *advancing* maupun *returning* lebih besar dan mengakibatkan lebih majunya titik separasi. Dengan desain sudut busur sudu Bach yang sesuai, diharapkan kenaikan gaya *drag* yang lebih signifikan pada sisi *advancing blade* dibandingkan kenaikan gaya *drag* pada sisi *returning blade*.
2. Dengan penambahan plat pada turbin angin Savonius tipe Bach dapat mengakibatkan pergeseran titik pusat gaya *drag* ke radius yang lebih besar sehingga diharapkan jarak lengan penyebab momen lebih besar dan gaya *drag* meningkat.

Hipotesa ini dapat dibuktikan dengan melakukan studi numerik turbin angin Savonius tipe Bach dengan sudut busur 124^0 , 130^0 ,

dan 135^0 tanpa adanya overlap dengan kondisi turbin berputar atau dinamis.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian yang perlu diperhatikan adalah:

1. Simulasi 2D, *unsteady (moving mesh)*, *incompressible flow*.
2. Simulasi dijalankan saat keadaan sudah *steady*.
3. Udara satu arah mengalir melewati *inlet* dengan berbagai variasi kecepatan konstan.
4. Analisa dilakukan pada turbin Savonius dengan bentuk sudu Bach.
5. Aliran udara yang berinteraksi dengan turbin bersih sehingga *fouling factor* dapat diabaikan.
6. Variasi sudut busur turbin Bach adalah 124^0 , 130^0 dan 135^0 tanpa adanya overlap.
7. Rotor dianalisa dalam keadaan dinamis.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui kontur aliran dan tekanan pada turbin Savonius tipe Bach dengan sudut busur 124° , 130° dan 135° .
2. Membandingkan distribusi koefisien tekanan, nilai *power coefficient*, dan *torque coefficient* dari turbin Savonius tipe Bach dengan sudut busur 124° , 130° dan 135° .

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan kontribusi perkembangan modifikasi sudu turbin Savonius untuk meningkatkan performa turbin.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Turbin angin adalah salah satu alat pengkonversi energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik yang akan diteruskan menuju generator untuk menghasilkan listrik. Secara umum, turbin dapat dibagi menjadi dua, yaitu turbin sumbu horizontal (HAWTs) dan turbin sumbu vertikal (VAWTs) berdasarkan posisi relatif antara sumbu rotasi dan arah angin. Turbin angin sumbu horizontal adalah jenis turbin angin yang memiliki sumbu putar sejajar dengan tanah. Turbin angin jenis ini adalah jenis turbin angin yang paling dominan digunakan didunia saat ini. Turbin angin jenis ini biasanya mempunyai sudu dengan bentuk irisan melintang khusus di mana aliran udara pada salah satu sisinya dapat bergerak lebih cepat dari aliran udara di sisi yang lain ketika angin melewatinya. Fenomena ini menimbulkan daerah tekanan rendah pada sudu bagian atas dan daerah tekanan tinggi di sudu bagian bawah. Perbedaan tekanan ini membentuk gaya lift yang menyebabkan sudu berputar dan kemudian menghasilkan menghasilkan listrik.

Berdasarkan jenis sudu, turbin angin sumbu horizontal dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu *sail wing*, *3 blades propeller*, *multi blades* dan tipe belanda. Berdasarkan arah datangnya angin, turbin sumbu horizontal dibedakan menjadi 2 yaitu *downwind* dan *upwind*. Keunggulan dari turbin angin sumbu horizontal adalah dasar dari menara yang tinggi yang akan mempermudah berputarnya turbin angin sumbu horizontal ini dikarenakan turbin angin sumbu horizontal membutuhkan kecepatan awal yang besar. Pada sejumlah lokasi, kecepatan angin meningkat sebesar 20% untuk setiap jarak sepuluh meter ke atas,.

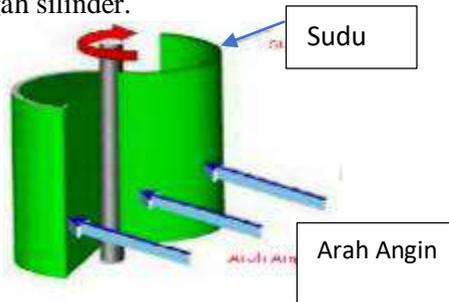
Turbin angin sumbu vertikal adalah jenis turbin yang memiliki sumbu putar yang tegak lurus terhadap tanah. Pada prinsipnya turbin angin sumbu vertikal hanya memanfaatkan selisih gaya *drag* yang ada di kedua sudu turbin sehingga

menghasilkan momen gaya terhadap sumbu rotor. Salah satu contoh dari turbin angin sumbu vertikal ialah turbin angin Savonius. Turbin ini bisa terdiri dari dua atau tiga plat yang dilengkungkan pada arah tangensial yang sama terhadap sumbu putar. Pengembangan turbin angin vertikal lainnya adalah dengan menggunakan *airfoil* yang tipis. Turbin angin bisa menghasilkan energi memanfaatkan gaya *lift* yang dihasilkan *airfoil* dan yang nantinya akan digunakan untuk memutar poros pada turbin angin.

Contoh dari turbin angin sumbu vertikal adalah turbin angin Savonius, turbin angin Darrieus, dan turbin angin rotor tipe-H. Keunggulan dari turbin angin sumbu vertikal adalah dapat menerima angin dari segala arah dan tidak dipengaruhi arah angin, sehingga tidak diperlukan mekanisme pengaturan arah angin seperti pada turbin angin horizontal. Keunggulan lainnya yaitu perancangan dari turbin angin sumbu vertikal yang sederhana sehingga memungkinkan penempatan komponen mekanik, elektronik, transmisi dan generator dekat dengan permukaan tanah.

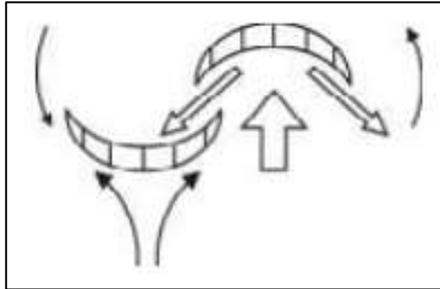
2.2 Turbin Angin Savonius

Seperti yang disebutkan sebelumnya, turbin angin Savonius merupakan turbin angin dengan sumbu vertikal. Turbin ini dirancang oleh peneliti bernama Sigurd J. Savonius (1922). Turbin angin ini memiliki konstruksi yang sederhana, dengan rotor yang berbentuk setengah silinder.



Gambar 2. 1 Skema Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius memanfaatkan selisih gaya *drag* yang ada di masing-masing sudu. Selisih dari gaya *drag* ini akan menghasilkan torsi yang apabila dikalikan dengan kecepatan angular dari turbin angin akan menghasilkan daya turbin. Semakin besar selisih dari gaya *drag* yang ada pada sudu maka torsi yang akan dihasilkan akan semakin besar. Turbin angin Savonius bekerja pada range tip *speed ratio* yang rendah. Turbin angin juga memiliki torsi awal yang besar dan kemampuan *self starting* yang baik, akan tetapi efisiensi yang dihasilkan relatif rendah.



Gambar 2. 2 Pola Aliran Pada Turbin Angin Savonius

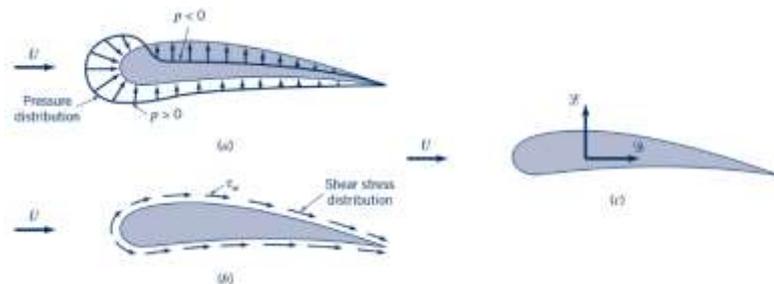
Untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius dapat dilakukan beberapa modifikasi, diantara lain:

1. Mengubah *bucket spacing* dan *overlap ratio*. Pada turbin Savonius terdapat dua jenis sudu yaitu jenis sudu yang bertumpukan melewati poros turbin (*overlapping*) ada juga sudu yang sedikit menjauh dari turbin. Kedua modifikasi ini berfungsi untuk mengurangi *wake* dibelakang *returning blade*.
2. Menambah jumlah sudu dan *stage*. Penambahan jumlah sudu bertujuan untuk mencari konfigurasi yang optimal dari suatu turbin dalam melakukan ekstraksi energi. Penambahan *stage* pada suatu turbin diharapkan dapat membuat suatu ekstraksi energi yang kontinyu karena letak sudu berada pada ketinggian yang berbeda.
3. Membuat bentuk sudu yang bervariasi ke arah vertikal dengan *twist angle*. Pada suatu turbin angin vertikal, umumnya ekstraksi energi pada turbin bagian dekat tanah menghasilkan energi yang lebih kecil karena kecepatan angin yang mengalir lebih rendah. Dengan adanya *twist angle*, sudu Savonius berbentuk *curved*, sehingga torsi yang dihasilkan *uniform* sepanjang sudu ke arah vertikal.

4. Penambahan stator. Stator adalah bodi statis tambahan dari suatu instalasi turbin yang berfungsi untuk mengkonsentrasikan aliran yang akan melintasi sudu dari Savonius.

2.3 Drag

Benda yang bergerak melewati fluida akan menimbulkan interaksi antara benda dan fluida itu sendiri. Interaksi ini dapat dilihat dalam bentuk gaya pada permukaan bertemunya fluida dan benda. Terdapat dua buah gaya yang ditimbulkan dalam interaksi tersebut yaitu gaya gesek yang diakibatkan efek viskos, dan gaya kearah normal yang diakibatkan tekanan seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.2. Gaya-gaya ini kemudian diproyeksikan ke sumbu horizontal dan sumbu vertikal. Resultan gaya kearah sumbu horizontal yang sejajar dengan arah kecepatan inilah yang disebut sebagai gaya hambat (*Drag*). Gaya *drag* adalah gaya yang menghambat pergerakan sebuah benda padat melalui sebuah fluida (cairan atau gas). Gaya *drag* mempunyai arah yang sejajar dengan sumbu kecepatan aliran terhadap luas penampang dari suatu benda, dengan arah yang berlawanan dengan arah aliran tersebut.



Gambar 2. 3 Gaya-gaya disekeliling fluida dalam penampang benda 2 dimensi
(a) *Pressure Force* (b) *Viscous Force* (c) *Resultant Force* (Munson et al, 2013)

Resultan gaya gesek dan distribusi tekanan pada seluruh permukaan benda kearah sumbu horisontal didapatkan dengan cara mengintegrasikan nilai kedua buah gayanya. Sehingga didapatkan persamaan *drag* sebagai berikut:

$$F_D = \int F_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau_w \sin \theta dA \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana P adalah distribusi tekanan dan τ_w adalah tegangan gesek. Persamaan diatas dapat diaplikasikan untuk segala jenis bentuk benda. Persamaan tersebut kemudian diubah kedalam bentuk yang lebih sederhana menjadi:

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \dots\dots\dots(2.2)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot A}$$

dimana:

- A : *Frontal area* (m²)
- F_D : *Gaya drag* (newton)
- ρ : *Massa jenis fluida* (kg/m³)
- U : *Kecepatan aliran udara* (m/s²)

Coefficient drag adalah suatu bilangan tak berdimensi yang menunjukkan besar kecilnya tahanan fluida yang diterima

Shape	<i>C_D</i> based on frontal area	Shape	<i>C_D</i> based on frontal area	Shape	<i>C_D</i> based on frontal area
					
	1.6		1.7		1.4
Half tube: 	1.2	Equilateral triangle: 	1.6	Hexagon: 	1.0
	2.3		2.0		0.7

Tabel 2. 1 Nilai *coefficient drag* untuk beberapa bentuk benda (White, 2010)

oleh suatu benda. Nilai C_D umumnya didapatkan dari hasil eksperimen.

2.4 Coefficient of Power (C_p)

Koefisien daya dan torsi merupakan salah satu pertimbangan bagaimana performa dari sebuah turbin angin. Kedua hal ini yang menunjukkan seberapa besar energi yang berhasil didapatkan oleh rotor turbin. Secara teori nilai C_p memiliki nilai maksimum yang dapat dicapai oleh turbin angin. Nilai maksimum ini yang juga disebut *Betz limit* memiliki nilai 59.26%. Nilai dari C_p ini didapatkan dari nilai energi yang di ekstrak dibandingkan dengan energi kinetik angin. Keluaran energi mekanik dari rotor merupakan hasil dari torsi yang dihasilkan dikalikan dengan kecepatan putar dari rotor, yang secara persamaan matematis di tuliskan sebagai berikut:

$$P = \frac{U_{tip}}{r} T = T\omega \dots \dots \dots (2.3)$$

Persamaan untuk mencari C_p adalah sebagai berikut:

$$C_p = \frac{\text{extracted energy}}{\text{wind kinetic energy}} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = C_T \lambda \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

P	: daya yang dapat diekstrak (Watt)
T	: torsi turbin angin (N.m)
Ω	: putaran turbin angin (rad/s)
ρ	: massa jenis udara (kg/m^3)
A	: luas penampang turbin (m^2)
v	: kecepatan angin freestream (m/s)
C_T	: koefisien torsi
λ	: tip speed ratio (TSR)
Ut _{tip}	: kecepatan pada tip <i>blade</i>

2.5 Coefficient of Torque (C_t)

Nilai koefisien torsi adalah rasio atau perbandingan antara nilai torsi yang dihasilkan oleh rotor dan torsi teoritis angin. Nilai

ini didapatkan pada saat turbin sudah dalam kondisi berputar, dimana persamaannya adalah sebagai berikut:

$$C_T = \frac{\text{rotor torque}}{\text{wind torque}} = \frac{T}{\frac{1}{4}\rho A d v} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana:

- T : Torsi (N.m)
- ρ : massa jenis (kg/m^3)
- A : luas penampang rotor (m^2)
- d : diameter satu sudu (m)
- v : kecepatan angin (m/s)

2.6 Coefficient of Static Torque (Cts)

Parameter yang lain yang bisa digunakan untuk mengetahui performa dari turbin angin Savonius adalah koefisien torsi statis. Koefisien ini menjelaskan torsi yang mengukur kemampuan self starting turbin dan didapatkan pada kondisi turbin diam. Persamaan matematis untuk static torque coefficient sebagai berikut:

$$C_{TS} = \frac{\text{rotor static torque}}{\text{wind torque}} = \frac{\tau}{\frac{1}{4}\rho.A.D.v^2} \dots\dots\dots(2.6)$$

- τ : torsi statis turbin (N.m)
- ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
- A : luas karakteristik turbin yang terkena fluida (m^2)
- D : diameter sudu turbin angin Savonius (m)
- U : kecepatan rata-rata fluida yang mengalir (m/s)

2.7 Teori Betz

Teori Betz merupakan teori yang berdasarkan pada permodelan aliran angin dua dimensi yang mengenai rotor yang akan menjelaskan prinsip konversi energi angin pada turbin angin. Pada dasarnya putaran rotor menghasilkan perubahan kecepatan angin pada arah tangensial yang berakibat berkurangnya jumlah total energi yang dapat diambil dari angin. Teori Betz merupakan

teori yang cukup baik untuk menjelaskan bagaimana energi angin dapat dikonversi menjadi bentuk energi lain. Berdasarkan gambar 2.4, dengan menganggap bahwa kecepatan udara yang melalui penampang S adalah sebesar v , maka aliran volume udara yang melalui penampang rotor pada setiap satuan waktu adalah:

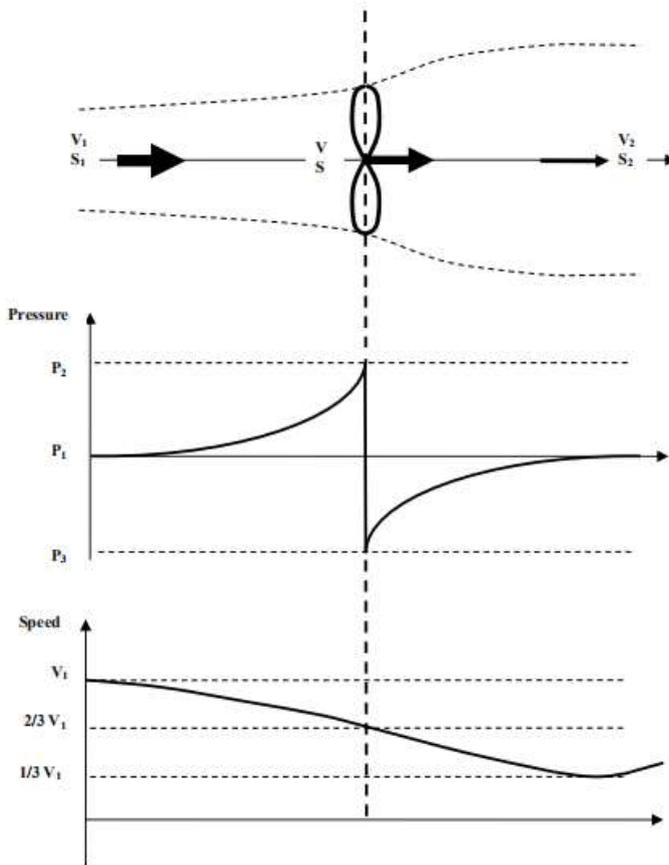
$$V = vS \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

V : laju volume udara (m^3/s)

v : kecepatan angin (m/s)

S : luas area sapuan rotor (m^2)



Gambar 2. 4 Kondisi Aliran Udara, Variasi Tekanan, dan Kecepatan Pada Model Ideal Turbin Angin (Ragheb, 2017)

Laju aliran massa dapat dirumuskan menjadi:

$$\dot{m} = \rho v S = constant \dots \dots \dots (2.8)$$

dimana

ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

Persamaan ini menyatakan bahwa laju aliran massa selalu konstan sepanjang aliran. Perhitungan selanjutnya ialah persamaan gaya pada rotor yang dikenai angin, dimana:

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = \dot{m} \Delta v = \rho S v (v_1 - v_2) \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana:

v_1 : kecepatan angin di daerah *upstream*

v_2 : kecepatan angin di daerah *downstream*

energi yang dihasilkan oleh angin dapat dituliskan dalam persamaan:

$$dE = F dx \dots \dots \dots (2.10)$$

Lalu didapatkan persamaan daya akibat aliran angin yang terjadi, dimana:

$$P = \frac{dE}{dt} = F \frac{dx}{dt} = Fv \dots \dots \dots (2.11)$$

Substitusi pada persamaan (2.9), didapatkan:

$$P = \rho S v^2 (v_1 - v_2) \dots \dots \dots (2.12)$$

Daya akibat adanya perubahan gaya kinetic dapat dibuat persamaanya, sebagai berikut:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} m v_1^2 - \frac{1}{2} m v_2^2}{\Delta t} = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) \dots \dots \dots (2.13)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.12) dengan persamaan (2.13) daya dapat ditulis menjadi:

$$P = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) \dots \dots \dots (2.14)$$

Menggabungkan persamaan (2.12) dengan persamaan (2.14) didapatkan:

$$\frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) = \rho S v^2 (v_1 - v_2) \dots \dots \dots (2.15)$$

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \dots \dots \dots (2.16)$$

Persamaan diatas menyatakan bahwa kecepatan angin pada rotor dapat diasumsikan sebagai kecepatan rata-rata dari kecepatan angin di daerah *upstream* (v_1) dan di daerah *downstream* (v_2). Persamaan (2.9) dan (2.14) dengan menggunakan nilai kecepatan yang baru pada persamaan (2.16) akan menjadi,

$$F = \rho S v (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \rho S (v_1^2 - v_2^2) \dots \dots \dots (2.17)$$

$$P = \rho S v^2 (v_1 - v_2) = \frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2)^2 (v_1 - v_2) = \frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \dots \dots \dots (2.18)$$

Downstream velocity factor (b), adalah rasio antara kecepatan downstream dan upstream, dengan persamaan dibawah ini:

$$b = \frac{v_2}{v_1} \dots \dots \dots (2.19)$$

Dengan memasukkan persamaan (2.19) kedalam persamaan (2.17) dan (2.18), maka persamaan gaya dan daya menjadi:

$$F = \frac{1}{2} \rho S v_1^2 (1 - b^2) \dots \dots \dots (2.20)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho S v_1^3 (1 - b^2)(1 + b) \dots \dots \dots (2.21)$$

Persamaan energi kinetik angin atau daya total yang melewati aliran *upstream*, dengan $v = v_1$ dan melewati luas penampang S, dapat dituliskan menjadi:

$$W = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \dots \dots \dots (2.22)$$

Koefisien daya adalah rasio antara daya yang dapat digunakan dengan daya total yang melewati penampang rotor. Ini juga menyatakan efisiensi yang dapat dicapai oleh suatu turbin angin. Dengan memasukkan persamaan 2.21 dan 2.22 maka persamaan koefisien daya adalah:

$$C_p = \frac{P}{W} = \frac{\frac{1}{4} \rho S v_1^3 (1 - b^2)(1 + b)}{\frac{1}{2} \rho S v_1^3} = \frac{1}{2} (1 - b^2)(1 + b) \dots \dots \dots (2.23)$$

Bila nilai $b=1$ dan $v_1=v_2$ dimasukkan, dan aliran angin diabaikan maka nilai koefisien daya akan bernilai nol, dimasukkan nilai $b=0$, $v_1=0$, maka koefisien daya bisa bernilai 0.5. Untuk mendapatkan nilai koefisien daya yang maksimal dapat digunakan konsep diferensial agar didapatkan nilai *downstream velocity factor* (b) yang optimal. Persamaannya menjadi:

$$\frac{dC_p}{db} = \frac{d}{2db} ((1 - b^2)(1 + b)) \dots \dots \dots (2.24)$$

$$0 = \frac{1}{2}((1 - b^2) - 2b(1 + b))$$

$$0 = \frac{1}{2}(1 - 3b^2 - 2b)$$

$$0 = \frac{1}{2}(1 - 3b(1 + b))$$

Dari persamaan diatas didapatkan:

$$b = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$$

$$v_2 = \frac{1}{3}v_1 \dots\dots\dots(2.25)$$

Persamaan diatas menunjukkan bahwa apabila diinginkan turbin angin bekerja optimal, maka downstream velocity factor harus bernilai 1/3 atau v2 yang bernilai satu per tiga dari v1. Memakai nilai yang ada ini maka nilai koefisien daya adalah:

$$Cp = \frac{1}{2} (1 - b^2)(1 + b) = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{1}{3} \right)^2 \right) = \frac{16}{27} = 0.59259 = 59.26 \% \dots\dots\dots(2.26)$$

0.59259 adalah nilai koefisien daya yang didapatkan, nilai ini disebut dengan Betz Limit. Nilai ini adalah nilai teoritis koefisien daya maksimum yang dapat dimanfaatkan dari aliran angin ideal.

2.8 Momentum Angular

Prinsip momentum angular untuk sebuah sistem yang menyatakan bahwa laju perpindahan dari momentum angular setara dengan nilai total torsi yang bekerja pada sistem.

$$\vec{T} = \frac{d\vec{H}}{dt} \text{system} \dots\dots\dots(2.27)$$

Dengan momentum angular pada sistem

$$\vec{H}_{system} = \int_{M(system)} \vec{r} \times \vec{V} dm = \int_{CV} \vec{r} \times \vec{V} \rho dV \dots\dots(2.28)$$

Torsi dapat ditimbulkan oleh gaya dan permukaan dan juga oleh poros. Pada saat momentum angular ini diaplikasikan pada finite control volume maka persamaannya menjadi:

$$\vec{r} \times \overrightarrow{Fs} + \int_{CV} \vec{r} \times \vec{g} \rho V + \vec{T}_{shaft} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{CV} \vec{r} \times \vec{V} \rho dV + \int_{CS} \vec{r} \times \vec{V} \rho \vec{V} d\vec{A} \dots\dots\dots(2.29)$$

Persamaan di atas menyatakan bahwa momen dari gaya-gaya di permukaan dan gaya-gaya di body, ditambah torsi yang diberikan, menyebabkan perubahan pada momentum angular dari aliran. Persamaan di atas disederhanakan dengan memilih fixed control volume yang menyelubungi rotor untuk mengevaluasi torsi poros. Pada kasus ini gaya-gaya pada permukaan, seperti gesekan bisa diabaikan karena diasumsikan jauh lebih rendah dibandingkan nilai torsi poros. Dengan mengabaikan gaya pada bodi selain torsi, maka untuk steady flow, persamaan torsi menjadi:

$$\vec{T}_{shaft} = \int_{CS} \vec{r} \times \vec{V} \rho \vec{V} d\vec{A} \dots\dots\dots(2.30)$$

Dimana:

- \vec{T}_{shaft} : Torsi
- r : Panjang lengan dari pusat gaya menuju posisi shaft
- \vec{V} : Kecepatan
- A : Luas area frontal

2.9 Dynamic Torque

Torsi dinamis yang diukur dari turbin angin Savonius dapat diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$T_D = \int F dr \dots\dots\dots(2.31)$$

Dimana

r : jari-jari silinder yang menerima beban (m)

Gaya yang bekerja pada poros turbin adalah sebagai berikut:

$$F = F_{DAdv} - F_{DRet} \dots\dots\dots(2.32)$$

Dimana

F_{DAdv} : Gaya drag yang berasal dari sisi advancing turbin

F_{DRet} : Gaya drag yang berasal dari sisi returning turbin

Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan persamaan daya actual turbin (P_T) sebagai berikut:

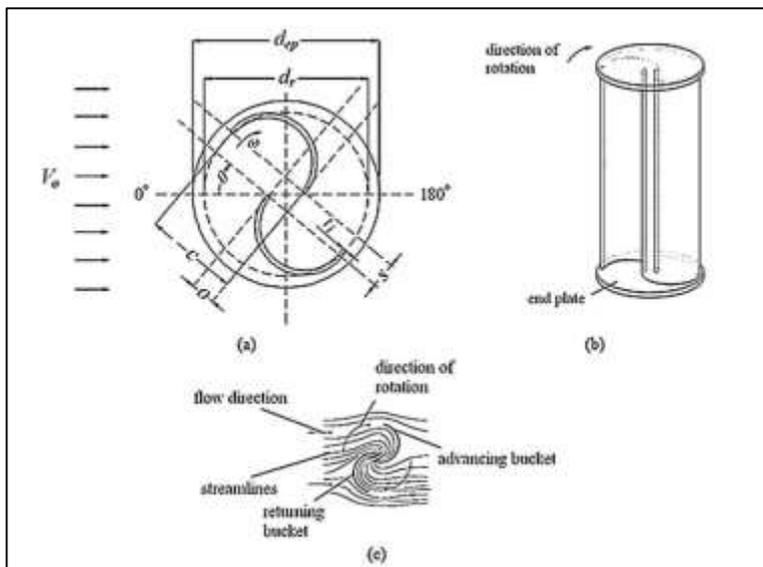
$$P_T = |F_{DAdv} - F_{DRet}| g.r.\omega \dots\dots\dots(2.33)$$

2.10 Penelitian Terdahulu

2.10.1 Akwa er al. (2012)

Pada penelitian ini peneliti ingin memberikan review pengaruh dari beberapa parameter geometri pada turbin angin Savonius seperti *end plates*, *aspect ratio*, *bucket spacing* dan *overlap*, jumlah *buckets* dan tingkatan rotor, *buckets* dan bentuk rotor, pemasangan poros atau aksesoris lain, Reynolds number dan *turbulence intensity*, dan pengaruh stator terhadap performa dari turbin angin Savonius.

Turbin angin Savonius bekerja karena gaya *drag* dari angin pada sudu, tetapi gaya *lift* juga berpengaruh pada tenaga mekanis yang akan disambung ke poros. Pada gambar 2.5 dijelaskan parameter dari turbin angin Savonius dengan dua sudu. Pada gambar 2.5 ditunjukkan bahwa t_i adalah tebal dari sudu, c adalah *chord* dari sudu, o adalah *overlap* sudu, s adalah jarak antar sudu, d_r adalah diameter rotor, dan d_{ep} adalah diameter *end plate*. Turbin ini akan dikenai angin dengan kecepatan V_0 dan kecepatan *angular* ω .



Gambar 2. 5 Skema rotor Savonius (a) gambar 2D (b) gambar 3D (c) *Flow pattern* di rotor (Akwa et al, 2012)

Parameter yang dianalisis dalam penelitian ini:

1. Efek dari *aspect ratio*

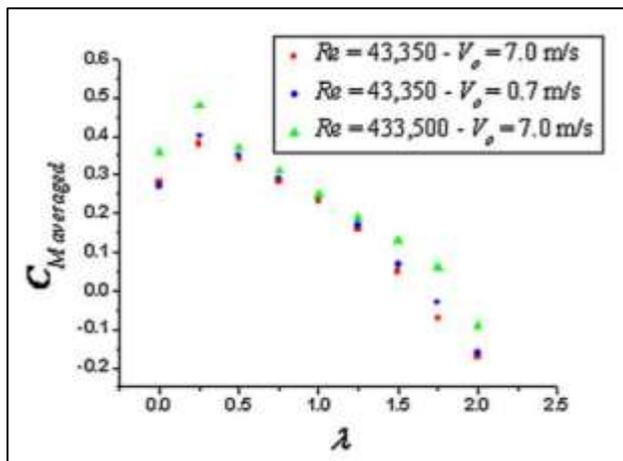
Aspect ratio adalah nilai yang didapat dari pembagian nilai H (tinggi turbin) dibagi dengan d_r (diameter rotor). Nilai *aspect ratio* tinggi yang dimiliki oleh rotor Savonius mempunyai *losses* yang kecil dikarenakan efek dari tip sudu. Penambahan nilai *aspect ratio* dari turbin Savonius mempunyai efek yang mirip dengan penambahan *end plates*. *Aspect ratio* yang bernilai 2.0 merupakan nilai optimal yang memberikan performa terbaik.

2. Pengaruh dari jarak sudu dan *overlap*

Banyak penelitian dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari jarak sudu dan *overlap* untuk performa rotor. Banyak

studi menyimpulkan bahwa sudu *overlap* dengan jarak antar sudu $S = 0$ menghasilkan performa yang paling baik untuk sudu yang mempunyai profil setengah lingkaran.

3. Pengaruh dari bentuk sudu
Berdasarkan beberapa penelitian, kebanyakan memilih opsi untuk merubah bentuk sudu menjadi berbentuk “*hooks*” seperti sudu tipe Bach. Salah satunya adalah Kamoji et. al (2009). Penelitian tersebut menemukan nilai koefisien daya paling besar 0.21, sementara untuk turbin Savonius bentuk standar hanya menghasilkan 0.19. Hal ini terjadi karena momen yang dihasilkan oleh turbin tipe Bach lebih besar dibandingkan turbin tipe konvensional dikarenakan aliran angin lebih banyak mengalir menuju ujung sudu.
4. Pengaruh dari Reynolds *number* dan *turbulence intensity*
Pengaruh Reynolds *number* pada turbin ini adalah memberikan efek terhadap fenomena separasi *boundary layer* pada sudu rotor. Peningkatan Reynolds *number* akan menunda terbentuknya separasi *boundary layer* pada sisi rotor yang cembung, terutama saat posisi rotor ada di sekitar 0^0 atau 180^0 . Pada gambar 2.6 ditunjukkan pengaruh Reynolds *number* terhadap koefisien momen dan TSR.

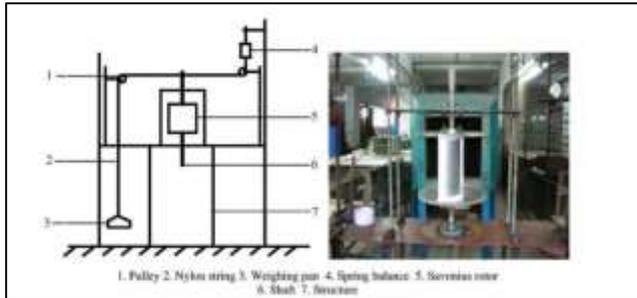


Gambar 2. 6 Pengaruh Reynolds Number Terhadap *Coefficient Of Moment* (Akwa et al, 2012)

2.10.2 Kamoji et al. (2009)

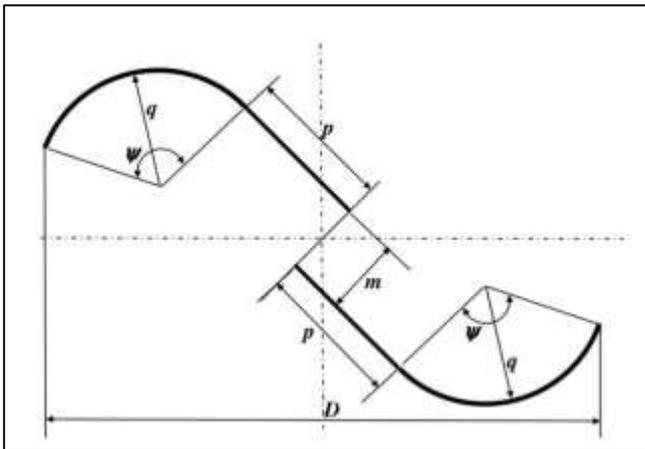
Pada penelitian yang dilakukan oleh Kamoji et al dilakukan studi eksperimen pengaruh dari sudut busur tipe Bach, *overlap ratio*, *aspect ratio*, *blade shape factor*, dan juga Reynolds number terhadap performa turbin termasuk *coefficient of power*. Pada penelitian ini juga membandingkan nilai C_p turbin tipe Bach dibandingkan dengan *coefficient of power* turbin Savonius konvensional.

Studi eksperimen ini dilakukan dengan alat yang terdiri dari pulley, benang nilon, pemberar, spring balance, rotor Savonius, poros dan struktur pendukung. Alat-alat tersebut disusun dengan skema seperti gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Diagram skema alat eksperimen (**Kamoji et al, 2009**)

Tujuan dari studi eksperimen ini adalah mengetahui pengaruh dari sudut turbin, overlap ratio, aspect ratio blade shape factor, dan juga Reynolds number terhadap performa turbin. Nilai sudut busur turbin sendiri merupakan sudut ψ . Nilai *overlap ratio* merupakan hasil perbandingan antara jarak antar sudu turbin (m) dengan diameter turbin (D). Nilai *aspect ratio* merupakan hasil perbandingan antara tinggi turbin (H) dengan diameter turbin (D). Nilai dari *blade shape factor* merupakan perbandingan nilai p dan q yang ada pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Diagram skema rotor Savonius yang diuji (**Kamoji et al, 2009**)

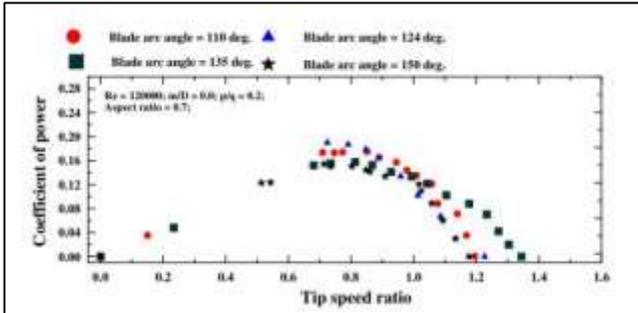
Pada table 2.2 ditunjukkan variasi rotor Savonius yang digunakan.

Tabel 2. 2 Nilai konfigurasi rotor Savonius untuk eksperimen (**Kamoji et al, 2009**)

Overlap ratio (m/D)	Aspect ratio (H/D)	Blade arc angle (ψ)	Blade shape factor (p/q)
0.0, 0.10, 0.16	0.77	124°	0.2
0.0	0.6, 0.7, 0.77, 1.0	124°	0.2
0.0	0.7	110°, 124°, 135°, 150°	0.2
0.0	0.7	124°	0.2, 0.4, 0.6

Eksperimen pengaruh sudut busur turbin terhadap *coefficient of power*, *coefficient of torque*, dan *coefficient of static torque* dilakukan dengan beberapa parameter pembatas. Parameter pembatas tersebut adalah nilai *aspect ratio* (H/D) 0.7, lalu sudut busur turbin 110°, 124°, 135°, dan 150°. Parameter selanjutnya ialah nilai *blade shape factor* yang bernilai 0.2 dan eksperimen

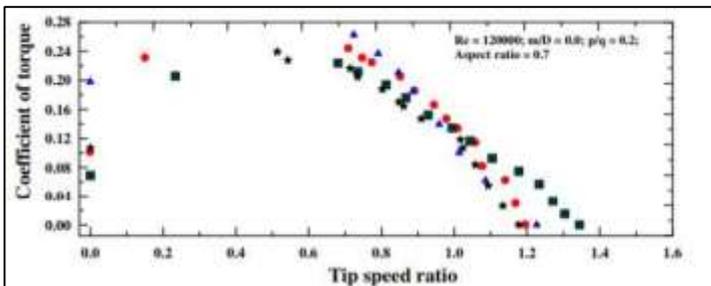
dilakukan dengan Reynolds number 120.000 dan 150.000. Hasil dari eksperimen ditunjukkan pada gambar 2.9



Gambar 2. 9 Grafik pengaruh sudut busur dan *tip speed ratio* terhadap C_p (Kamoji et al, 2009)

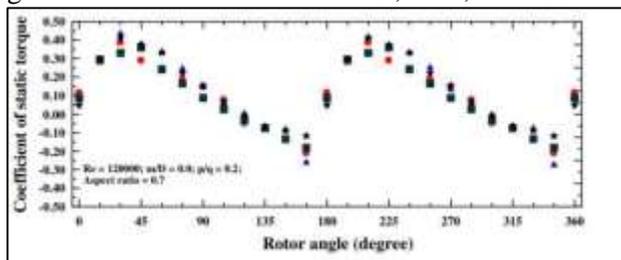
Pada eksperimen yang dilakukan pada Reynolds number 120.000 didapatkan hasil bahwa nilai C_p paling tinggi 0.19 didapat pada sudut busur sudu turbin 124° dengan *tip speed ratio* 0.72, diikuti dengan sudut busur turbin 110° , 135° dan 150° .

Gambar 2.10 menunjukkan, untuk nilai C_t paling tinggi 0.27 didapat pada sudut busur sudu turbin 124° dengan *tip speed ratio* 0.72, diikuti dengan sudut busur sudu turbin 110° , 135° , dan 150° .



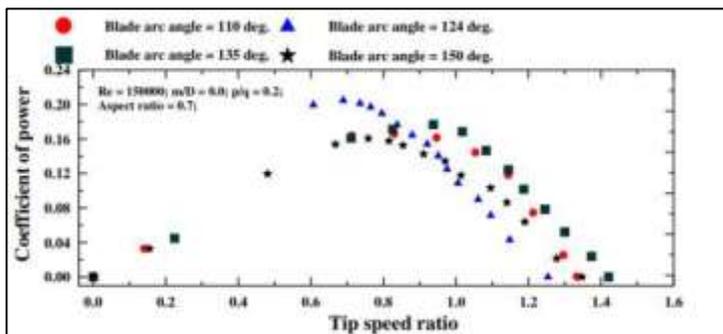
Gambar 2. 10 Grafik pengaruh sudut busur turbin dan *tip speed ratio* terhadap C_t (Kamoji et al, 2009)

Gambar 2.11 menunjukkan, nilai C_{ts} paling tinggi 0.45 didapat pada sudut busur sudu turbin 124° dengan sudut rotor 30° , diikuti dengan sudut busur sudu turbin 150° , 110° , dan 135° .



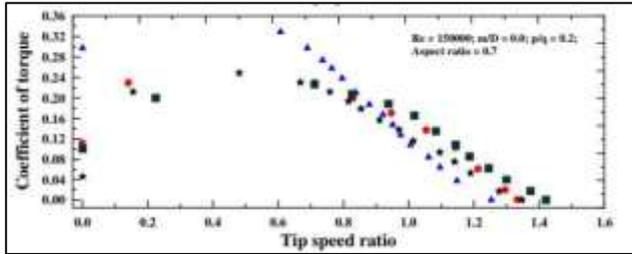
Gambar 2. 11 Grafik pengaruh sudut busur turbin dan posisi rotor terhadap C_{ts} (Kamoji et al, 2009)

Eksperimen kedua dilakukan dengan variasi parameter rotor yang sama akan tetapi dengan Reynolds number yang berbeda yaitu 150.000. Gambar 2.12 menunjukkan, nilai C_p paling tinggi 0.21 didapat pada sudut busur sudu turbin 124° dengan *tip speed ratio* 0.69, diikuti dengan sudut busur sudu turbin 135° , 110° , dan 150° .



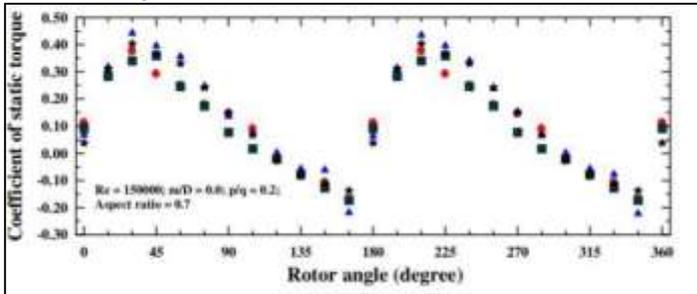
Gambar 2. 12 Grafik pengaruh sudut busur turbin dan *tip speed ratio* terhadap C_p (Kamoji et al,2009)

Pada gambar 2.13 menunjukkan nilai C_t paling tinggi 0.3 didapat pada sudut busur sudu turbin 124° , dengan *tip speed ratio* 0.69, diikuti dengan sudut busur sudu turbin 110° , 135° , dan 150° .



Gambar 2. 13 Grafik pengaruh sudut busur turbin dan *tip speed ratio* terhadap C_t (Kamoji et al, 2009)

Pada gambar 2.14 menunjukkan bahwa nilai C_{ts} paling tinggi 0.45 didapat pada sudut busur turbin 124° dengan sudut rotor 30° diikuti dengan sudut busur sudu turbin 150° , 110° dan 135° .

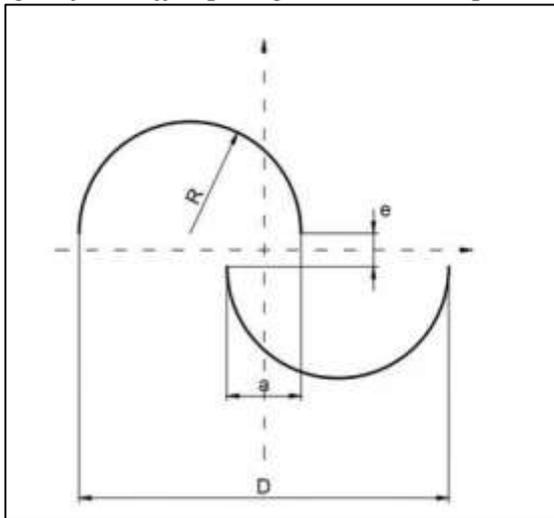


Gambar 2. 14 Grafik pengaruh sudut busur turbin dan posisi rotor terhadap C_{ts} (Kamoji et al, 2009)

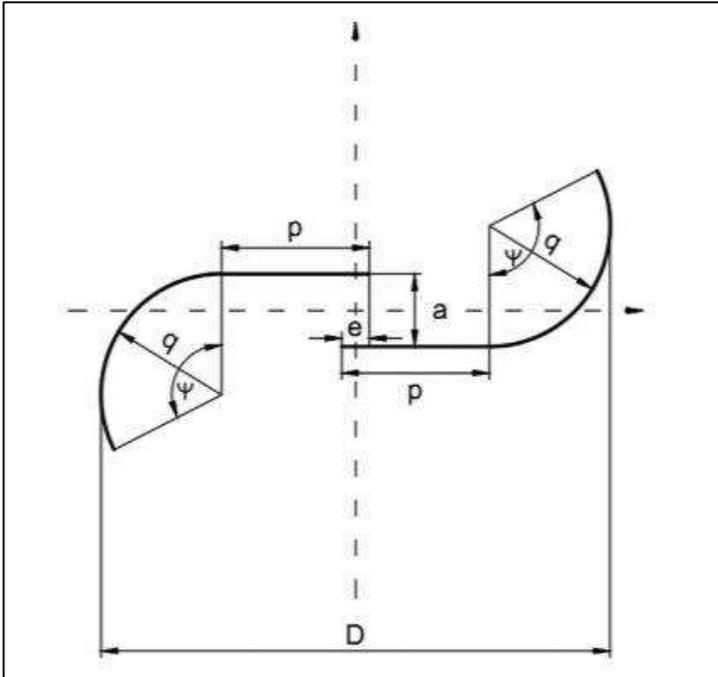
Dari data-data hasil eksperimen diatas dapat disimpulkan bahwa rotor turbin dengan performa paling baik adalah rotor dengan *aspect ratio* (H/D) = 0.7, sudut busur turbin 124° dan *blade shape factor* (p/q) = 0.2. Rotor ini menghasilkan $C_p = 0.21$, $C_t = 0.3$, dan $C_{ts} = 0.45$ pada Reynolds number 150.000.

2.10.3 K. Kacprzak et al. (2013)

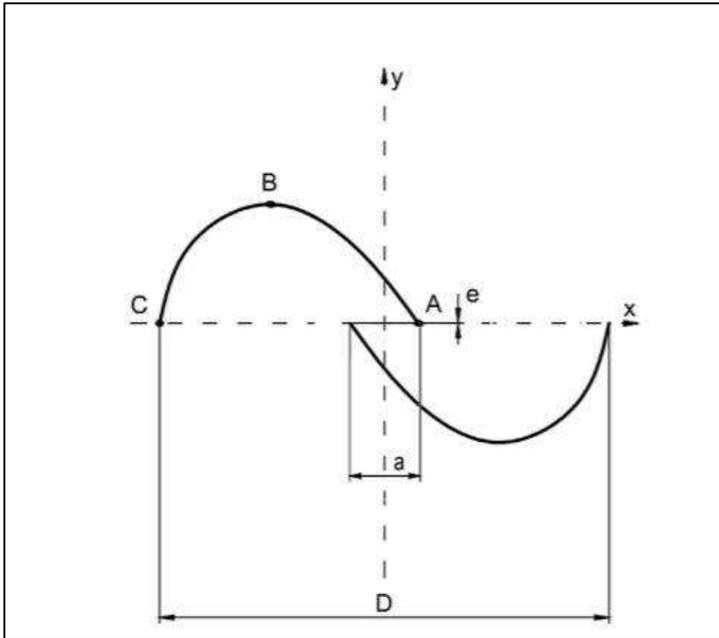
Penelitian yang dilakukan oleh K. Kacprzak et al. merupakan studi simulasi perbandingan performa antara turbin Savonius konvensional dengan turbin yang sudah dimodifikasi bentuknya menjadi eliptik dan tipe Bach, Skema masing-masing turbin yang diuji ditunjukkan pada gambar 2.15 sampai 2.17.



Gambar 2. 15 Skema turbin angin Savonius konvensional (K. Kacprzak et al, 2013)



Gambar 2. 16 Skema turbin angin Savonius tipe Bach (**K. Kacprzak, 2013**)



Gambar 2. 17 Skema turbin angin Savonius tipe eliptik (K. Kacprzak et al, 2013)

Pada studi ini simulasi yang akan dijalankan merupakan simulasi transien dan dilakukan dengan software ANSYS CFX dengan bidang 2D. Studi simulasi ini dilakukan dengan rotor ukuran diameter, overlap ratio, gap ratio, sudut busur turbin, dan shape factor seperti yang ditampilkan pada table 2.3.

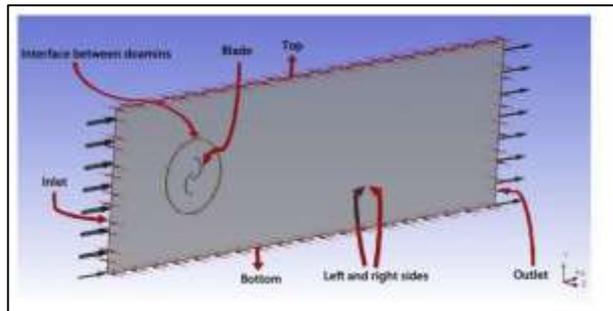
Tabel 2. 3 Nilai konfigurasi rotor Savonius untuk eksperimen (K. Kacprzak et al, 2013)

Geometrical parameters of the tested models.					
	Diameter D [m]	Overlap ratio a/D	Gap ratio e/D	Blade arc angle ψ [$^\circ$]	Shape factor p/q
Classical	0.2	0.15	0	180	n/a
Bach-type	0.2	0	0	135	0.2
Elliptical	0.2	0.15	0	180	n/a

Pada penelitian ini digunakan dua model yaitu *Shear Stress Transport $k-\omega$ turbulence model* dan juga $\gamma - \theta$ transition model. Permodelan pertama yaitu *turbulence model* sudah berhasil digunakan di studi yang sejenis. Model ini seharusnya bisa memberikan prediksi mengenai separasi aliran dengan akurat.

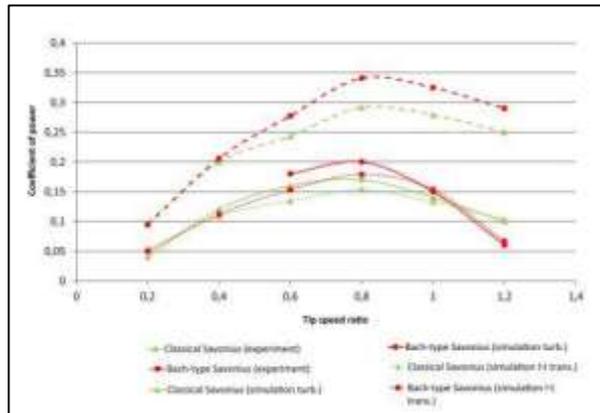
Salah satu tujuan dari studi ini adalah memprediksi fenomena terjadinya transisi antara aliran laminar dan turbulen pada *boundary layer* sudu turbin, oleh karena itu diperlukan mesh yang rapi disekitar sudu turbin. Untuk bisa menunjukkan fenomena ini maka dilakukan juga simulai dengan *model $\gamma - \theta$ transition model*.

Pada simulasi ini turbin disusun didalam *domain* yang diberi tanda untuk setiap sisi seperti, *inlet*, *outlet*, dan *symmetry*. Susunan domain beserta turbin nya di ilustrasikan pada gambar 2.18.



Gambar 2. 18 Susunan domain simulasi (K. Kacprzak et al, 2013)

Nilai C_p dari bentuk yang diuji dibandingkan dengan data eksperimen turbin angin Savonius yang sebelumnya pernah dilakukan oleh Kamoji et al (2009). Data hasil perbandingan nilai C_p hasil simulasi dengan eksperimen, ditampilkan pada gambar 2.19.

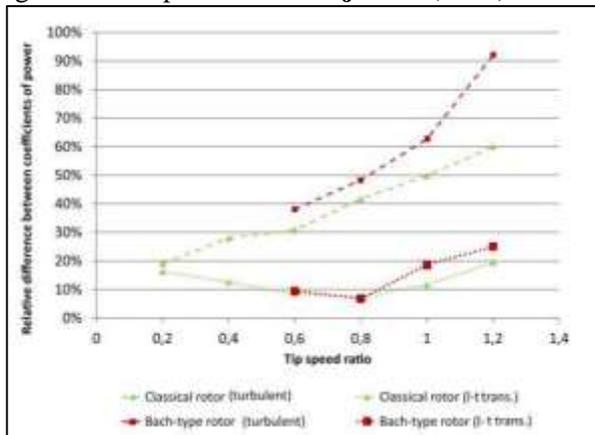


Gambar 2. 19 Grafik perbandingan C_p hasil simulasi dengan eksperimen (K. Kacprzak et al. 2013)

Dalam eksperimen didapatkan nilai C_p tipe Bach dengan nilai 0.2 lebih tinggi dibandingkan dengan tipe konvensional

dengan nilai 0.17. Pada simulasi dengan *model transisi* $\gamma - \theta$, nilai C_p tipe Bach juga lebih tinggi dengan nilai 0.18 dan untuk tipe konvensional dengan nilai 0.15. Hasil simulasi dengan model *turbulen* $k-\omega$ SST, nilai C_p yang didapat untuk turbin tipe Bach juga bernilai lebih tinggi dibanding dengan turbin tipe konvensional. Akan tetapi, nilai yang didapat berbeda, dengan nilai C_p tipe Bach 0.34 dan tipe konvensional 0.29.

Perbedaan yang signifikan antara hasil simulasi *model transisi* $\gamma - \theta$ dan juga *turbulen* $k-\omega$ SST ditunjukkan pada gambar 2.20. Sumbu vertikal yang ditampilkan pada gambar 2.19 menunjukkan perbedaan relatif antara nilai yang didapat dari simulasi dengan nilai eksperimen **Kamoji et al (2009)**.



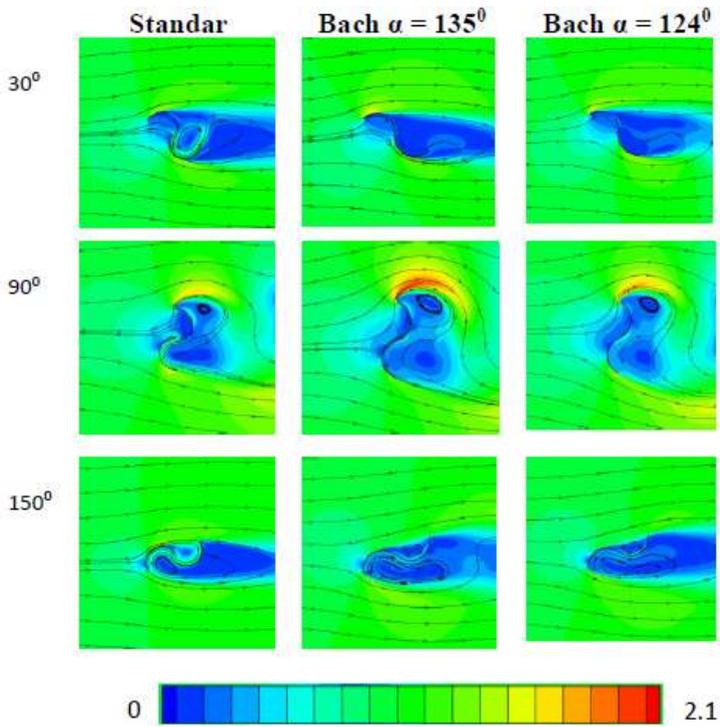
Gambar 2. 20 Perbandingan antara hasil simulasi model turbulen dan model transisi (**K. Kacprzak et al. 2013**)

Pada nilai tip speed ratio 0.4 dan seterusnya, terdapat perbedaan nilai C_p antara simulasi model turbulen dengan eksperimen terus meningkat hingga 90% untuk sudu rotor tipe Bach dan 60% untuk sudu rotor tipe konvensional. Perbedaan antara simulasi model transisi dengan eksperimen nilainya menurun hingga angka 8% untuk sudu rotor tipe Bach dan tipe

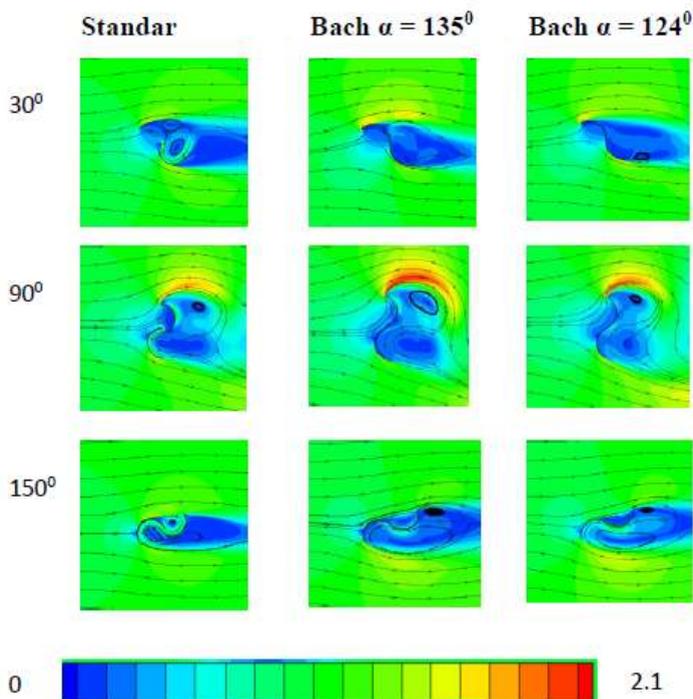
kovensional pada tip speed ratio 0.8 dan naik sedikit hingga 25% untuk sudu rotor tipe Bach dan 20% untuk sudu rotor tipe konvensional.

2.10.4 Zharfan (2019)

Penelitian yang dilakukan oleh Zharfan yaitu berupa simulasi dua dimensi yang menggunakan *software ANSYS Fluent* pada turbin angin Savonius standar dan bentuk Bach dengan sudut besar sudu 124^0 dan 135^0 dengan kondisi rotor diam atau tidak berputar terhadap performa turbin termasuk kontur kecepatan dan tekanan, koefisien tekanan, dan koefisien torsi statis. Penelitian ini dilakukan dengan sudut putar sebesar 30^0 , 90^0 , dan 150^0 dan pada variasi kecepatan 4 dan 7 m/s. Hasil dari simulasi ini dapat dilihat pada gambar 2.21 dan 2.22.



Gambar 2. 21 Kontur *Dimensionless Velocity* (V/V_∞) pada variasi kecepatan $V = 7$ m/s



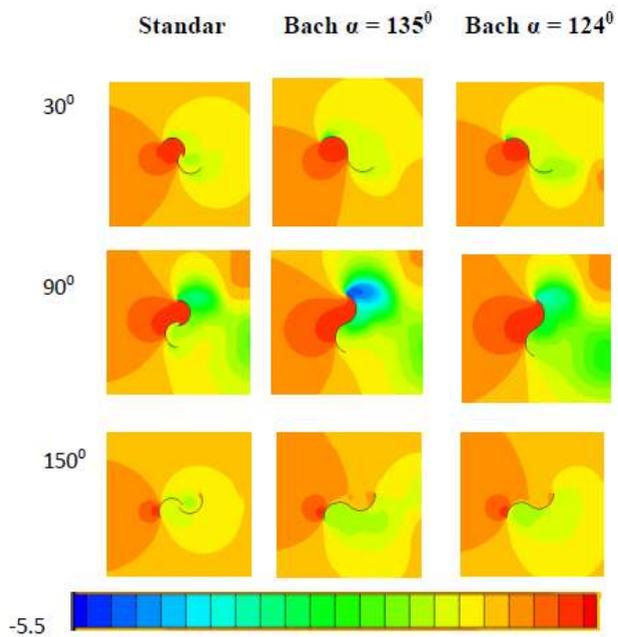
Gambar 2. 22 Kontur *Dimensionless Velocity* (V/V_∞) pada variasi kecepatan $V = 4$ m/s

Pada turbin Savonius tipe standar dengan posisi $\theta = 30^\circ$, aliran yang melewati turbin mengalami peningkatan kecepatan pada sudu *advancing* di bagian ujungnya. Peningkatan kecepatan ini mengakibatkan terbentuknya titik separasi dan terbentuklah daerah *wake* pada bagian belakang sudu *advancing* turbin. Pada posisi $\theta = 90^\circ$, kecepatan yang dihasilkan nilainya lebih tinggi dibandingkan dengan posisi $\theta = 30^\circ$ dan pada sudu *advancing* mengalami percepatan di ujungnya. Titik stagnasi juga terbentuk

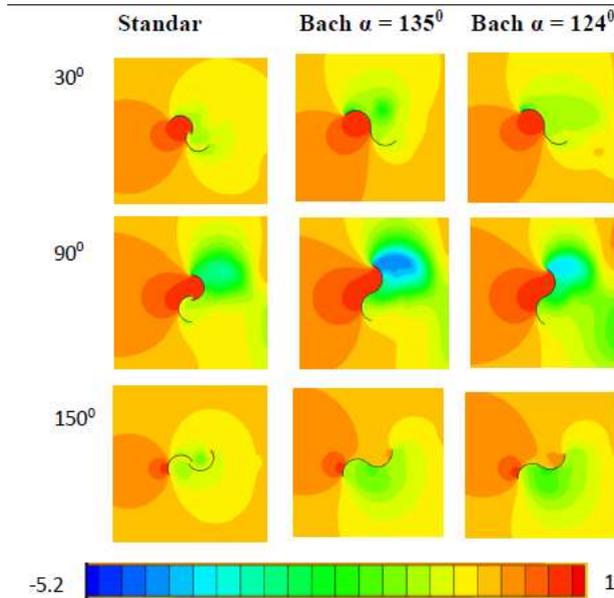
pada sudu *advancing* dan *returning*, pada ujung sudu *returning* bagian bawah juga terjadi peningkatan kecepatan yang akan membentuk titik separasi dan daerah *wake*. Kejadian ini juga terjadi pada posisi $\theta = 150^\circ$, untuk meminimalisir terbentuknya daerah *wake* ini dengan adanya *overlap*. Aliran yang dipercepat pada sudu *returning* dan menumbuk sudu *advancing* yang akan melewati permukaan sudu *advancing* dikarenakan adanya *overlap* yang menjadi aliran itu.

Perbedaan yang mendasar pada desain turbin tipe Bach adalah tidak adanya *overlap* dan lebih pendeknya jari-jari sudu turbin. Area *wake* yang terbentuk dari aliran pada saat $\theta = 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$ lebih besar pada bentuk turbin tipe Bach 135 dan Bach 124 dibandingkan dengan turbin Savonius standar baik pada sudu *advancing* maupun *returning*. Lebih besarnya area *wake* yang signifikan hanya terjadi pada sudu *advancing*, dengan lebih besarnya area *wake* pada sudu *advancing*. Selisih gaya *drag* antara sudu *advancing* dan sudu *returning* pada turbin tipe Bach lebih besar dibandingkan dengan turbin Savonius standar.

Untuk kontur koefisien tekanan bisa dilihat dari gambar 2.23 dan 2.24.



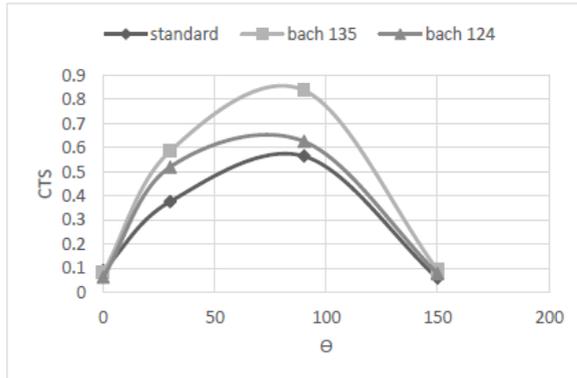
Gambar 2. 23 Kontur koefisien tekanan pada variasi kecepatan 7 m/s



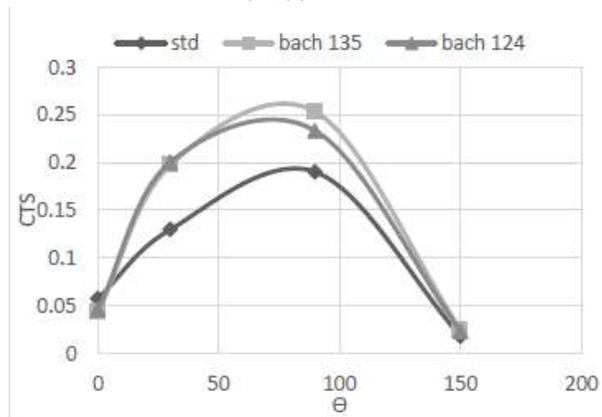
Gambar 2. 24 Kontur koefisien tekanan pada variasi kecepatan 4 m/s

Pada gambar 2.23 dan 2.24, dengan sudut putar $\theta = 30^{\circ}$, turbin tipe Bach 135 dan 124 memiliki area dengan koefisien tekanan maksimal hanya ada pada sudu *advancing*. Pada turbin tipe standar, area dengan koefisien tekanan maksimal ada pada sudu *advancing* dan *returning*. Jadi momentum yang lebih besar didapatkan pada turbin dengan tipe Bach 135 dan 124, karena area dengan koefisien tekanan maksimum terpusat di sudu *advancing*. Kedua tipe turbin ini memiliki perbedaan koefisien tekanan pada bagian depan dan belakang sudu *advancing* yang lebih besar dibandingkan dengan tipe standar. Hal ini dapat dilihat dari perbedaan level warna dominan hijau pada tipe Bach 135 dan pada tipe Bach 124, dan hijau muda pada Savonius standard.

Koefisien torsi statis yang dihasilkan pada turbin Savonius standar, turbin Savonius tipe Bach 124 dan 135 dapat dilihat pada gambar 2.25 dan 2.26.



Gambar 2. 25 Grafik perbandingan koefisien torsi statis pada $V = 7 \text{ m/s}$



Gambar 2. 26 Grafik perbandingan koefisien torsi statis pada $V = 4 \text{ m/s}$

Berdasarkan grafik diatas, turbin Savonius tipe Bach 124 memiliki nilai koefisien torsi paling rendah terdapat pada posisi θ

= 0^0 dan naik pada saat posisi $\theta = 30^0$ dan $\theta = 90^0$ dan pada saat posisi $\theta = 150^0$. Pada turbin tipe standar, nilai pada saat posisi turbin $\theta = 0^0$ paling rendah dan pada saat posisi $\theta = 30^0$ dan $\theta = 90^0$ nilainya naik dan akan turun pada posisi $\theta = 150^0$. *Trendline* semua tipe turbin semua memiliki *trend* naik hingga $\theta = 90^0$ kemudian turun hingga $\theta = 150^0$. Dan untuk grafik masing-masing turbin tidak ada yang berpotongan. Nilai koefisien torsi statis yang paling tinggi terdapat pada turbin tipe Bach 135.

Nilai koefisien torsi statis minimum pada kecepatan 7 m/s dan 4 m/s, nilai koefisien torsi statis untuk semua tipe turbin tidak memiliki selisih yang besar. Modifikasi bentuk turbin Bach 135 dan Bach 124 tidak membuat kemampuan self starting turbin Bach 135 dan 124 berbeda jauh dengan turbin Savonius standard

BAB III METODELOGI PENELITIAN

3.1 Variasi dan Domain Simulasi

3.1.1 Variasi

Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik menggunakan software ANSYS Fluent. Penelitian dengan metode numerik ini memiliki tiga tahapan. Langkah pertama adalah tahap pro processing, processing, dan post processing. Penelitian ini dilakukan di laboratorium CAE Gedung Teknik Mesin ITS.

Model yang dibuat pada penelitian ini berupa geometri dua dimensi dari turbin Savonius tipe Bach dengan variasi besar sudut busur turbin sebesar 124^0 , 130^0 , dan 135^0 . Performa dari modifikasi turbin Savonius ini dapat diketahui dengan membuat variasi besar sudut turbin dan juga variasi kecepatan putar.

Tabel 3. 1 Variasi Penelitian

Parameter	Nilai
Jenis Turbin	Turbin angin Savonius tipe Bach dengan Sudut Busur Sudu sebesar 124^0 , 130^0 , dan 135^0
Kecepatan angin (m/s)	4 m/s
Metode	2 Dimensi
Solver Type	Pressure Based
Model Viscous	SST k- ω
Cell Zone Conditions (Rotating Domain)	Mesh Motion
Pressure-velocity coupling scheme	Coupled
Gradient	Last square cell based
Pressure	Second order upwind
Momentum	Second order upwind
Turbulent kinetic energy	Second order upwind
Laminar kinetic energy	Second order upwind
Specific dissipation rate	Second order upwind

Kriteria konvergensi	10^{-5}
----------------------	-----------

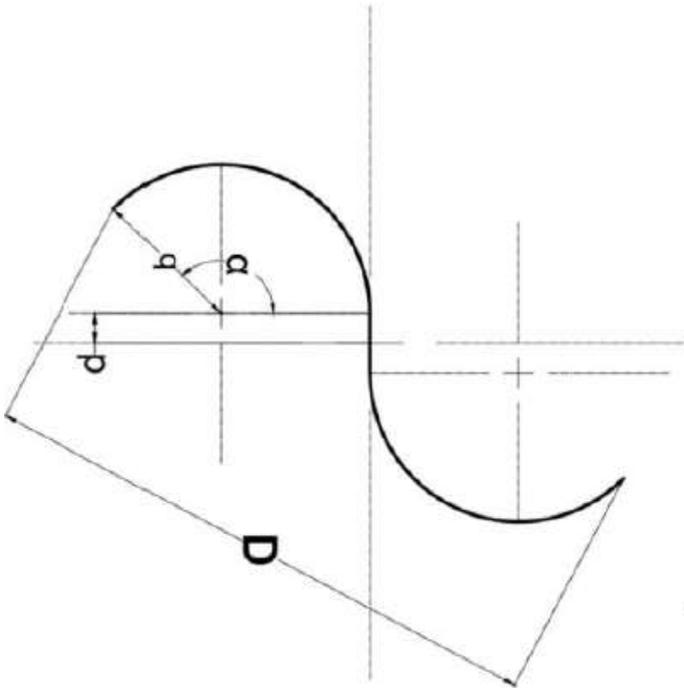
3.1.2 Domain Simulasi

Penelitian ini merupakan penelitian dengan kondisi turbin Savonius berputar, sehingga terdapat dua domain yaitu *static* dan *dynamic domain*. *Static domain* adalah domain yang dilewati fluida dan *domain* ini tidak bergerak, sedangkan *dynamic domain* adalah *domain* yang bergerak. *Domain* ini ditunjukkan dengan persegi panjang dan lingkaran yang mengelilingi geometri dan turbin Savonius yang diteliti.

3.2 Tahap Pre-Processing

3.2.1 Pembuatan Geometri dan Meshing

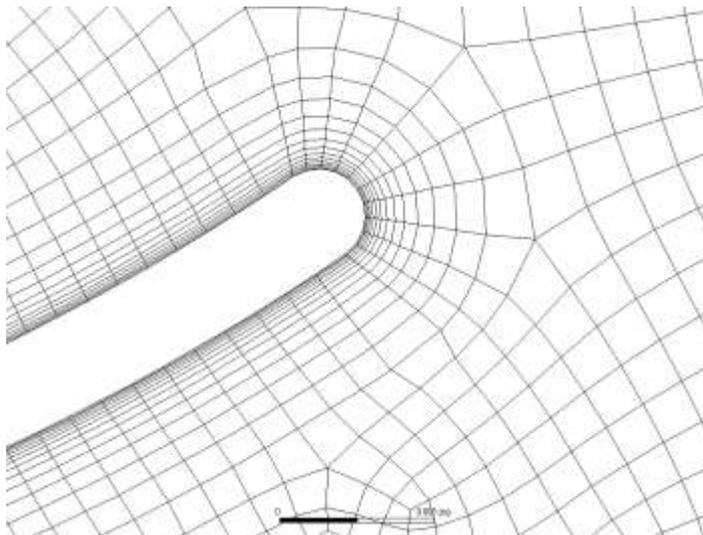
Dalam tahap pre-processing ini, dibuat model dari turbin Savonius yang akan dipakai dalam analisa numerik. Pembuatan geometri menyangkut pembuatan domain sekitar model yang akan dipakai. Pembuatan geometri turbin Savonius ini, yang akan ditunjukkan pada gambar 3.1. Variasi pada pembuatan geometri ini adalah pada sudut busur turbin sebesar 124° , 130° , dan 135° .



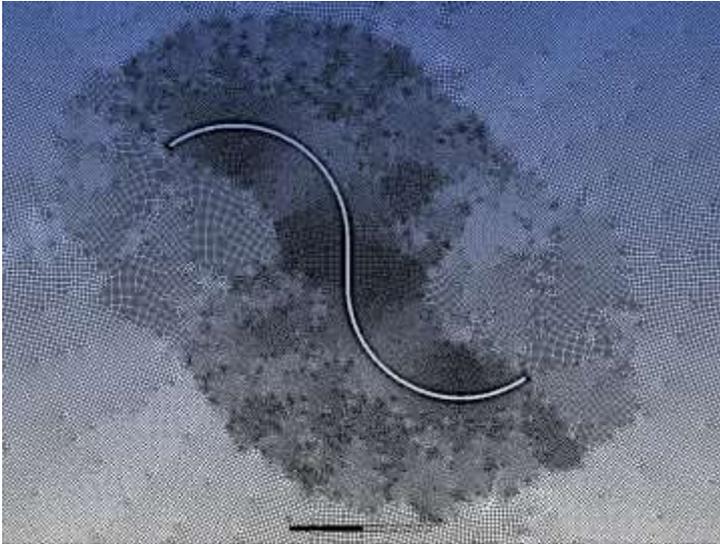
Gambar 3. 1 Geometri Turbin Angin Savonius Tipe Bach

Pembuatan *meshing* merupakan pembagian geometri yang telah dibuat menjadi elemen-elemen kecil sehingga parameter yang ditentukan dapat dipalिकासikan ke setiap elemen kecil ini. Elemen tersebut berisi persamaan yang nantinya akan diselesaikan secara numerik. Proses *meshing* ini dimulai dari *meshing garis* atau *edge*, *meshing face*, lalu *meshing volume*. Dikarenakan benda yang akan

diuji berbentuk dua dimensi maka proses *meshing* hanya sampai pada *meshing face*. Hasil *meshing* bisa dilihat pada gambar 3.2 dan 3.3.



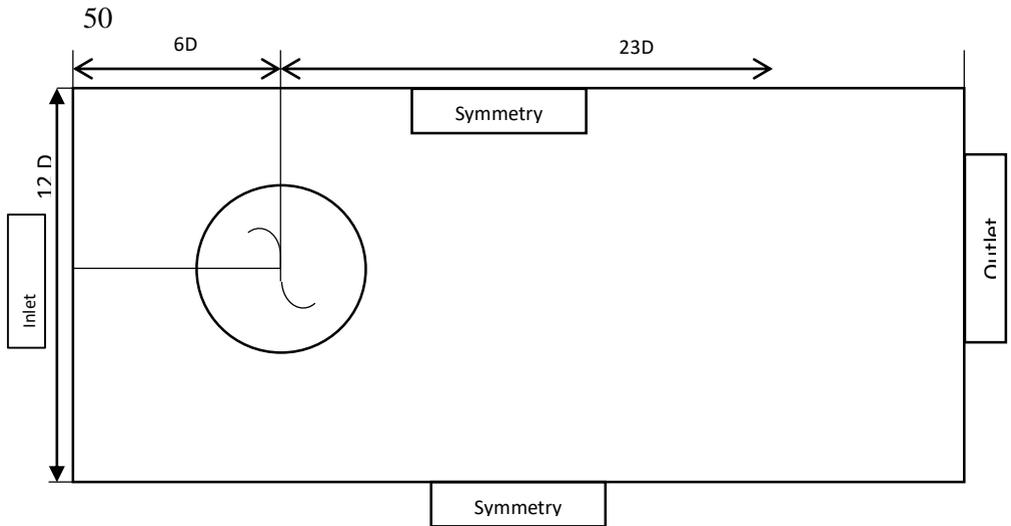
Gambar 3. 2 *Meshing Pada Blade*



Gambar 3. 3 *Meshing* Pada Benda Uji

3.2.2 Boundary Condition

Boundary Condition adalah penentuan parameter pada batasan-batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji. Batasan-batasan yang ditetapkan untuk penelitian ini adalah *inlet*, *outlet*, *wall*, dan *symmetry*. *Boundary condition* yang digunakan pada sudu turbin adalah *wall*, pada *inlet* ditetapkan *velocity inlet*, pada *outlet* ditetapkan *outflow*, dan untuk pembatas atas dan bawah ditetapkan *symmetry*. Pada *velocity inlet* diatur kecepatan sebesar 4 m/s. Nilai *turbulent intensity* yang digunakan sebesar 1 % (Akwa et al., 2012; Kamoji et al., 2009) dan *turbulent length scale* sebesar 0.03 mm. *Boundary condition* untuk penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3. 4 *Boundary Condition* Penelitian

3.2.3 Solver

Setelah melakukan *meshing* dan penentuan *Boundary Condition*, mengekspor file tersebut agar terbaca pada *ANSYS Fluent*. Selanjutnya akan dilakukan *solver*. Tahapan *solver* adalah sebagai berikut

3.2.3.1 General

Pada tahapan *General* ini dilakukan pemilihan *Pressure Based*, dan pada pilihan *time* digunakan *transient*.

3.2.3.2 Models

Pada langkah ini dilakukan permodelan dengan model yaitu *turbulence model viscous k- ω SST*. Pemilihan model ini dipilih untuk mendapatkan hasil yang akurat.

3.2.3.3 Material

Fluida kerja yang digunakan pada simulasi ini adalah udara dengan densitas $1,225 \text{ kg/m}^3$, viskositas $1,7894 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$.

3.2.3.4 Cell Zone Condition

Pada tahapan ini diatur tentang pemilihan *Rotating Zone* dan *Stationary Zone*. *Rotating Zone* diatur dalam keadaan *Mesh*

Motion, dimana berputar dengan variasi kecepatan sudut yang sebanding dengan variasi tiga buah *TSR*.

3.2.3.5 Boundary Condition

Pada tahapan ini dilakukan untuk mengatur *Velocity Magnitude* pada *inlet* sebesar 4 m/s. Setelah mengatur kecepatan pada *inlet*, kita perlu mengatur *Turbulence Specification Method* dengan menggunakan pilihan *Intensity* dan *Turbulent Length Scale* dengan *Turbulence Intensity* sebesar 1% dan *Turbulent Length Scale* sebesar 0.03 mm. Kemudian mengatur pergerakan dari *wall* dengan memilih pengaturan *moving wall* dengan *motion rotational*.

3.2.3.6 Solution

Pada tahapan *solution* ini dipilih dengan metode *Coupled* dan solusi *second order* untuk parameter *pressure*, *momentum*, *turbulent kinetic energy* dan *turbulent dissipation rate*.

3.2.3.7 Initialize

Tahapan ini merupakan penentuan titik acuan sebagai permulaan perhitungan iterasi. Pada opsi *initialize* dipilih pada pilihan *Hybrid Initialize*.

3.2.3.8 Residual

Pada tahap ini adalah penentuan nilai error yang diinginkan pada proses iterasi mencapai kriteria konvergen. Nilai yang ditetapkan adalah 1×10^{-5} untuk semua parameter. Proses iterasi akan berhenti apabila semua nilai error mencapai 1×10^{-5} .

3.2.3.9 Run Calculation

Pada tahapan ini akan dilakukan pengaturan berupa proses kalkulasi yaitu *Time Step Size*, *Number of Time Step*, dan *Max Iteration/Time Step* dari 5 *Tip Speed Ratio* yaitu sebesar 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 dan 0.9 dengan rincian sebagai berikut

Tabel 3. 2 Variasi *Tip Speed Ratio*

Jenis Turbin	Tip Speed Ratio	Time Step Size	Number of Time Step
$\alpha = 124^\circ$	0.5	0.0053192	72
	0.6	0.004326	72
	0.7	0.003799	72
	0.8	0.003245	72
	0.9	0.002955	72
$\alpha = 130^\circ$	0.5	0.005602	72
	0.6	0.004668	72
	0.7	0.004003	72
	0.8	0.003501	72
	0.9	0.0031125	72
$\alpha = 135^\circ$	0.5	0.0065618	72
	0.6	0.0054705	72
	0.7	0.004691	72
	0.8	0.004101	72
	0.9	0.003645	72

3.3 Tahap Processing

Pada tahap *processing*, parameter-parameter yang telah ditetapkan pada saat *pre-processing* akan dihitung dengan jumlah iterasi yang ditentukan hingga mencapai kriteria konvergensi yang diinginkan yaitu 10^{-5} . Jika kriteria konvergensi sudah tercapai maka langkah selanjutnya adalah tahap *post processing* dan apabila kriteria konvergensi belum tercapai maka kembali lagi ke tahapan pembuatan *meshing*.

3.4 *Tahap Post Processing*

Setelah diperoleh solusi dari tahap *processing*, maka tahap selanjutnya adalah tahap *post processing*. Pada tahap ini dilakukan analisis hasil dari solusi tersebut. Pada tahap ini data-data yang didapatkan berupa kontur kecepatan dan tekanan, *coefficient of power*, dan *coefficient of torque*, pada *advancing* dan *returning blade* sebagai fungsi θ (posisi rotor).

3.4.1 *Perhitungan Bilangan Reynolds*

Bilangan Reynolds akan digunakan untuk menentukan *turbulent intensity* pada Fluent. Bilangan Reynolds dihitung menggunakan rumus:

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \dots\dots\dots(3.1)$$

Dimana:

1. ρ = Densitas udara = 1.225 kg/m^3
2. V = Kecepatan angin = 4 m/s dan 7 m/s
3. d = Diameter sudu turbin (0.1524 m)
4. μ = Viskositas udara = $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$

3.5 *Grid Independence Test*

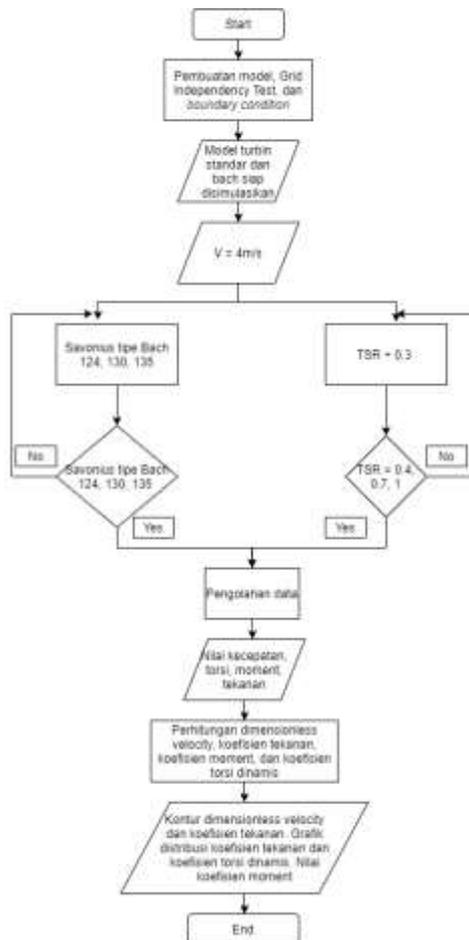
Grid Independence Test merupakan proses untuk menentukan jumlah *mesh* dan struktur *grid* yang optimal agar memperoleh data yang akurat. Data yang didapat dari simulasi dibandingkan dengan data validasi dari penelitian sebelumnya yang dinyatakan dalam persen error. Hasil dari proses ini yaitu berupa permodelan yang akurat dengan jumlah *grid* seminimal mungkin. Hasil *Grid Independence Test* ditampilkan pada tabel 3.1.

Tabel 3. 3 *Grid Independence Test* Turbin Savonius Tipe Bach dengan variasi sudut busur turbin 135^0

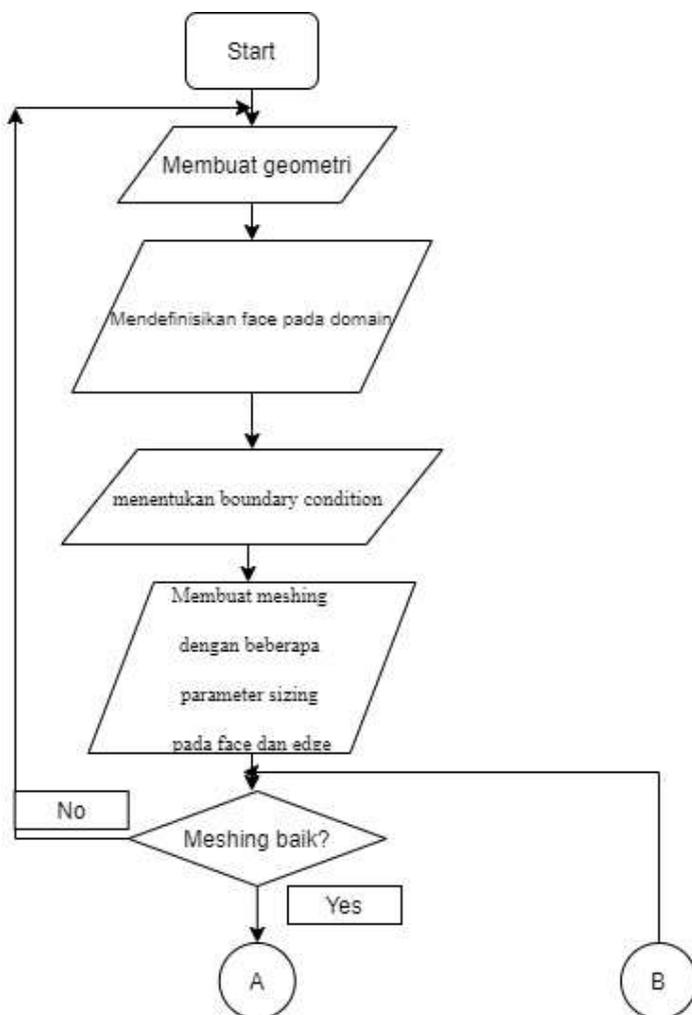
No	Jumlah Mesh	y+	Momment (N.m)	Error (%)
1	73823	2.34	2.320	
2	84218	2.34	2.341	0.905
3	97450	3.39	2.368	1.14
4	135073	2.33	2.350	0.76

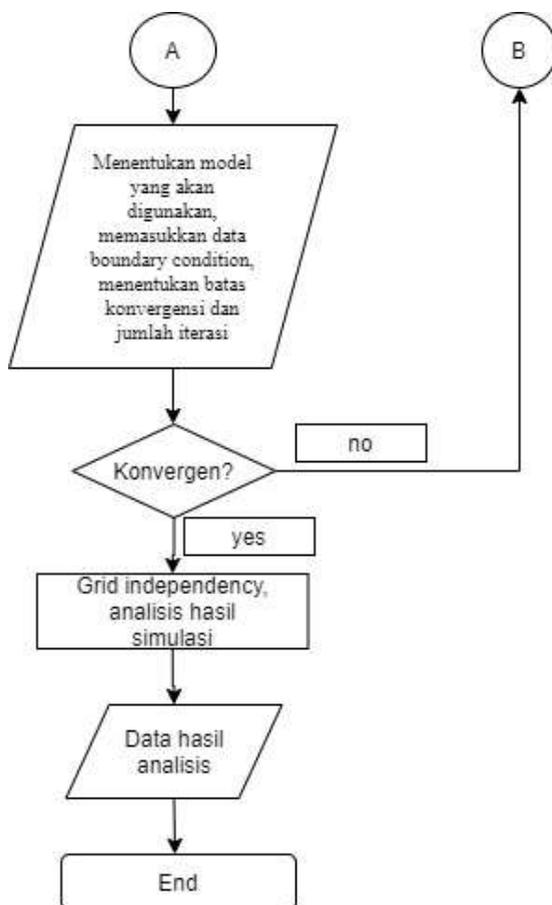
Berdasarkan tabel 3.3 dapat disimpulkan bahwa untuk Turbin Angin Savonius tipe *Bach* menggunakan jumlah *cell* 135073 dikarenakan nilai error relatif yang sudah dibawah 0.8%

3.6 Flowchart



Gambar 3. 5 Flowchart Penelitian





Gambar 3. 6 Flowchart Simulasi Numerik

(Halaman Sengaja Dikосongkan)

BAB IV ANALISA DAN DISKUSI

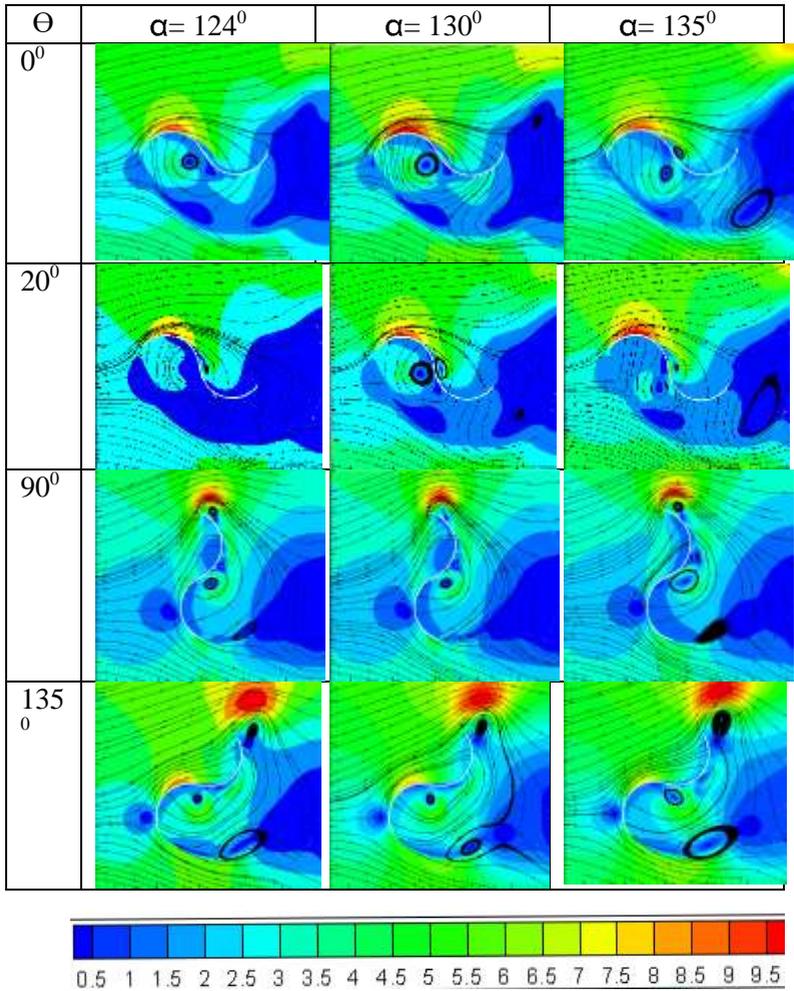
Pada bab kali ini akan dijelaskan mengenai analisa dan diskusi dari analisa numerik yang telah dilakukan di beberapa variasi. Hasil yang akan ditampilkan adalah hasil kuantitatif dan hasil kualitatif. Hasil kualitatif yang akan ditampilkan adalah visualisasi aliran yaitu kontur koefisien tekanan, dan juga kontur *dimensionless velocity*. Hasil kuantitatif yang akan ditampilkan adalah distribusi koefisien tekanan sepanjang permukaan turbin, grafik koefisien torsi dan *coefficient of power* terhadap *tip speed ratio*.

4.1 Kontur Dimensionless Velocity (V/V_∞)

Dimensionless velocity adalah perbandingan antara nilai kecepatan di suatu titik dan nilai kecepatan referensi / *inlet*. Ditampilkannya kontur nilai *dimensionless velocity* ini bertujuan untuk melihat perbedaan yang signifikan antar semua jenis turbin dan juga semua sudut putar yang diuji. Pada sub bab ini akan dibahas bagaimana nilai *dimensionless velocity* pada masing-masing jenis turbin dan juga sudut putar, dan bagaimana pengaruh dari bentuk masing-masing jenis turbin terhadap terbentuknya area yang memiliki nilai *dimensionless velocity* nol atau yang mendekati nol yang bisa disebut area *wake*. Seperti pada gambar 4.1, dapat dilihat di posisi turbin Bach dengan sudut busur sudu 130° , 135° , dan 124° dengan posisi $\theta = 0^\circ$ atau posisi awal, aliran fluida menumbuk bagian depan sudu *advancing* sehingga memiliki kontour berwarna biru. Pada posisi $\theta = 20^\circ$ terjadi peningkatan kecepatan pada ujung sudu *advancing* yang bisa dilihat dari perbedaan warna kontour dari posisi awal, peningkatan ini mengakibatkan terbentuknya titik separasi yang akan membentuk daerah *wake* di bagian belakang sudu *advancing*. Pada posisi ini juga muncul *vortex* / pusaran aliran di sisi depan dan

belakang plat akibat *boundary layer separation* oleh sisi cembung sudu *advancing*. Karena adanya *vortex* tersebut, aliran udara yang mengarah ke sisi cembung dan cekung *returning* terhambat. Sebaliknya udara lebih banyak ke sisi cekung *advancing* dan mengarahkan turbin untuk berputar. Di bagian ujung sudu *advancing* terjadi peningkatan kecepatan aliran yang berkaitan dengan efek *Coanda*, yang merupakan kecenderungan fluida untuk tetap melekat pada permukaan datar atau melengkung ketika mengalir melewati permukaan. Hal ini juga terjadi pada sudu *returning* yang mengalami peningkatan kecepatan sehingga membentuk titik separasi dan membentuk daerah wake di belakang sudu *returning*.

Pada posisi $\theta = 90^0$, pada ujung sudu *advancing* juga terjadi peningkatan kecepatan dapat dilihat dari luasnya warna kontour merah pada turbin Bach dengan sudut busur sudu 135^0 , 124^0 dan 130^0 . Perbedaan dari turbin Bach dengan sudut busur sudu 135^0 dengan Bach 124^0 dan 130^0 terletak pada terbentuknya kontour merah yang lebih luas daripada Bach 124 dan 130. Peningkatan kecepatan ini akan membentuk titik separasi sehingga daerah wake akan terbentuk pada bagian sudu *advancing*. Pada ujung sudu *returning* terjadi peningkatan kecepatan dengan nilai yang lebih kecil dibandingkan pada ujung sudu *advancing*. Peningkatan kecepatan ini akan mengakibatkan terbentuknya titik separasi yang akan membentuk daerah *wake* pada bagian belakang sudu *returning*. Pada posisi $\theta = 135^0$, pada ujung sudu *advancing* juga terjadi peningkatan kecepatan yang tinggi, khususnya pada turbin Bach dengan sudut busur sudu 135^0 , 130^0 dan 124^0 terlihat kontour merah yang lebih luas dibandingkan pada posisi $\theta = 90^0$.



Gambar 4. 1 Kontour *Dimensionless Velocity* (V/V_∞)

Peningkatan ini mengakibatkan terbentuknya titik separasi yang akan membentuk daerah wake di bagian belakang sudu *advancing*. Perbedaan bentuk kontur turbin Bach dengan sudut busur sudu 130° , 135° dan 124° terletak pada besarnya daerah peningkatan kecepatan. Pada turbin Bach dengan sudut busur sudu 124° dengan $\theta = 20^{\circ}$, level warna kuning kemerahan pada ujung sudu *advancing* memiliki daerah yang lebih kecil dibanding pada turbin Bach dengan sudut busur sudu 135° dan 124° . Pada sudu *returning*, daerah peningkatan kecepatan pada ujung sudu juga memiliki daerah yang lebih kecil dibandingkan dengan turbin Bach dengan sudut busur sudu 130° dan 135° . Pada $\theta = 135^{\circ}$, turbin Bach dengan sudut busur sudu 135° memiliki daerah kontour dengan level merah yang lebih luas dibandingkan dengan turbin Bach dengan sudut busur sudu 130° dan 124° pada sudu *advancing*.

Berdasarkan hasil penjabaran diatas, turbin Savonius tipe Bach memiliki peningkatan kecepatan pada ujung sudu yang mengakibatkan terbentuknya area *wake* pada belakang sudu *advancing*.

4.2 Kontur Koefisien Tekanan (C_p)

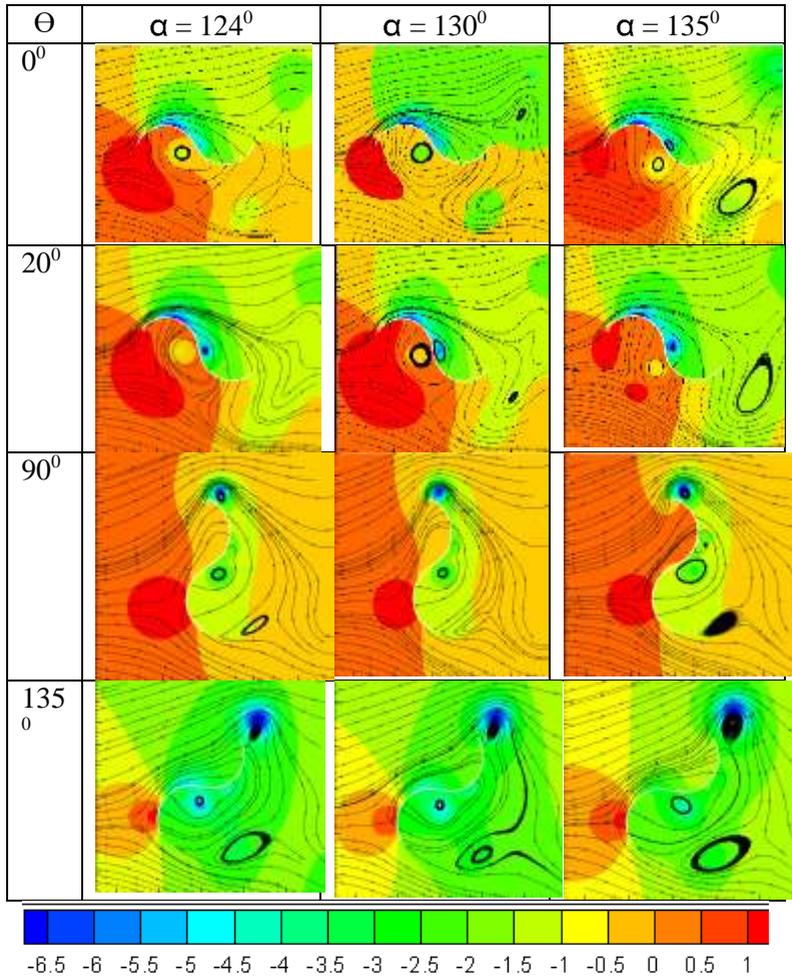
Koefisien tekanan adalah nilai yang bisa membantu melihat seberapa besar penurunan tekanan yang terjadi. Pada penelitian ini, penurunan tekanan yang besar akan mengakibatkan jenis turbin tersebut akan lebih mudah berputar. Hal ini sesuai dengan prinsip fluida mengalir dimana fluida mengalir dari daerah dengan tekanan tinggi ke daerah dengan tekanan rendah.

Pada gambar 4.2, dengan posisi awal $\theta = 0^{\circ}$, turbin Bach dengan sudut busur sudu 130° , 135° dan 124° memiliki area dengan koefisien tekanan yang lebih besar berada pada ujung sudu *advancing*. Hal ini bisa dilihat pada perbedaan kontour paling

merah berada pada sudu *advancing*. Ketiga tipe turbin ini memiliki perbedaan koefisien tekanan pada bagian depan dan belakang sudu *advancing*, hal ini dapat dilihat dari perbedaan level warna kontour warna merah pada depan sudu *advancing* dan hijau pada belakang sudu *advancing*. Perbedaan tekanan ini berpengaruh terhadap turbin, apakah bisa berputar atau tidak. Ini dikarenakan prinsip momentum dimana semakin tinggi perbedaan koefisien tekanan pada sudu *advancing* maka akan semakin mudah berputar turbin tersebut.

Pada saat posisi $\theta = 20^0$ pada semua turbin Bach dengan sudut busur sudu 130^0 , 135^0 dan 124^0 memiliki kontour dominan merah pada depan sudu *advancing* dan *returning*, tetapi perbedaan koefisien tekanan yang lebih signifikan ada pada sudu *advancing* bukan pada sudu *returning*. Pada turbin Bach dengan sudut busur sudu 124^0 dan 130^0 memiliki bentuk kontour yang kurang lebih sama pada bagian belakang sudu *advancing*. Perbedaan di depan sudu *advancing* dimana memiliki level warna dominan oranye kemerahan dan pada belakang sudu *advancing* memiliki level warna hijau.

Pada posisi $\theta = 90^0$ pada semua turbin Bach dengan sudut busur sudu 130^0 , 135^0 dan 124^0 memiliki kontour dominan merah pada depan sudu *returning*, warna oranye pada depan sudu *advancing*. Hal ini menyebabkan momentum yang dibutuhkan untuk memutar sudu *advancing* lebih kecil daripada posisi yang lain. Kondisi ini juga sama pada saat posisi $\theta = 135^0$. Urutan besarnya area dengan koefisien tekanan maksimum adalah turbin



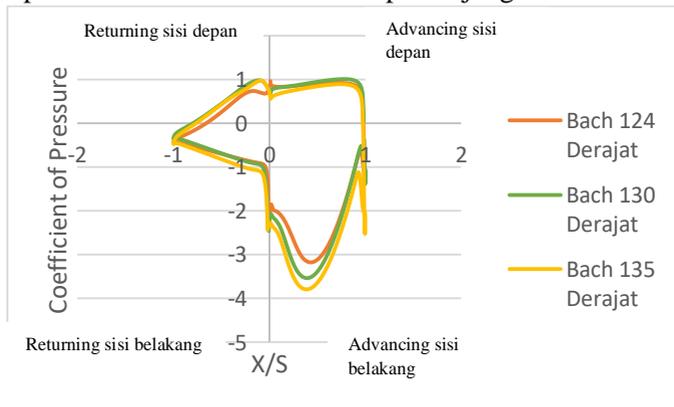
Gambar 4. 2 Kontour Koefisien Tekanan

Bach dengan sudut busur sudu 135° lalu diikuti Bach denga sudut busur sudu 130° dan Bach 124° , perbedaan ini

berpengaruh terhadap momentum yang dibutuhkan untuk memutar turbin. Pembahasan bagaimana distribusi nilai koefisien tekanan sepanjang permukaan sudu turbin akan dibahas pada sub bab berikutnya.

4.3 Distribusi Koefisien Tekanan

Sub bab ini akan menjelaskan bagaimana distribusi nilai koefisien tekanan sepanjang sudu *advancing* dan *returning* turbin pada *tip speed ratio* 0.7. Gambar 4.3 menunjukkan distribusi tekanan sepanjang sudu *advancing* dan *returning*. Sumbu x pada grafik menunjukkan posisi pada permukaan (X) relatif terhadap panjang busur sudu (S). Untuk turbin tipe Bach dengan sudut busur sudu 130° , 135° dan 124° , $X/S = 0$ berada pada titik tengah bagian depan turbin dan $X/S = 1$ berada pada ujung terluar sudu.



Gambar 4. 3 Distribusi Koefisien Tekanan Sepanjang Permukaan $\Theta = 20^{\circ}$

Pada turbin tipe Bach sudut busur sudu 135° , 124° dan 130° , bagian depan sudu *advancing* merupakan area dimana terdapat titik stagnasi, dimana memiliki nilai koefisien tekanannya merupakan nilai maksimum 1. Pada ujung sudu *advancing* bagian

atas ada percepatan aliran. Hal ini mengakibatkan nilai koefisien tekanan turun hingga -3.8 untuk turbin tipe Bach 135, -3.5 untuk tipe Bach 130⁰ dan -3.2 untuk tipe Bach 124⁰. Sepanjang bagian belakang sudu turbin advancing dan returning, nilai koefisien tekanan akan naik hingga sampai ujung sudu returning, selanjutnya akan turun sedikit dikarenakan terjadinya kenaikan kecepatan. Setelah turun pada ujung sudu returning, nilai koefisien tekanan akan naik kembali menuju nilai maksimum 1 sepanjang bagian depan sudu returning sampai mendekati titik stagnasi. Semakin dekat menuju titik stagnasi, maka nilai koefisien tekanan akan semakin mendekati nilai 1.

Tabel 4. 1 Tabel Koefisien Drag Pada Turbin Angin Savonius Tipe Bach pada posisi $\Theta=20^0$

Tipe Turbin	Fd Advancing (N)	Fd Returning (N)	Cd Advancing	Cd Returning
Bach 124	1.64	1.21	1.0980	0.8101
Bach 130	1.774	1.44	1.19	0.964
Bach 135	1.922	1.65	1.286	1.1047

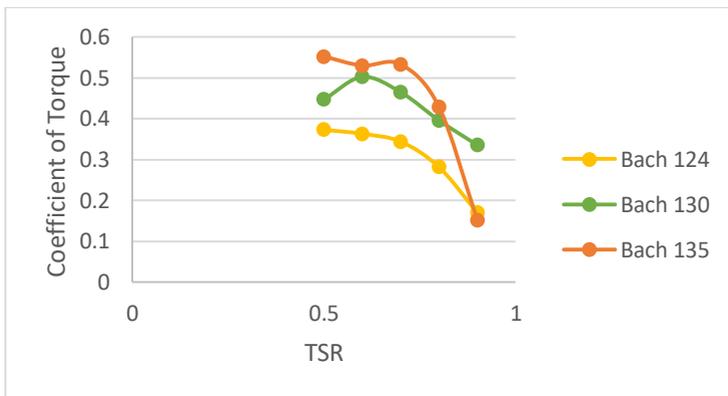
Perbedaan yang terlihat antara grafik distribusi koefisien tekanan pada Bach 135⁰, 130⁰ dan 124⁰ adalah selisih C_p ada Bach 130⁰ dan 124⁰ tidak terlalu besar, perbedaan ini memberikan pengaruh ke nilai koefisien drag. Tabel 4.1 menampilkan nilai koefisien drag pada semua tipe turbin dan kedua sudunya.

Dimana koefisien drag sudu advancing pada Bach 135⁰ sebesar 1.286, pada sudu returning sebesar 1.1047. Pada Bach 130⁰ didapatkan nilai koefisien drag sudu advancing sebesar 1.19, pada

sudu returning sebesar 0.964. Pada Bach 124° didapatkan nilai koefisien drag pada sudu advancing sebesar 1.098, pada sudu returning sebesar 0.8101. Dari hasil diatas maka didapatkan bahwa Bach dengan sudut busur sudu 135° memiliki nilai koefisien drag yang lebih besar dibandingkan dengan Bach 130° dan 124° .

4.3 Koefisien Torsi VS Tip Speed Ratio

Pada sub bab kali ini membahas perbandingan nilai koefisien torsi pada Bach dengan sudut busur sudu 135° , 130° dan 124° pada Tip Speed Ratio sebesar 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 dan 0.9.



Gambar 4. 4 Koefisien Torsi vs Tip Speed Ratio

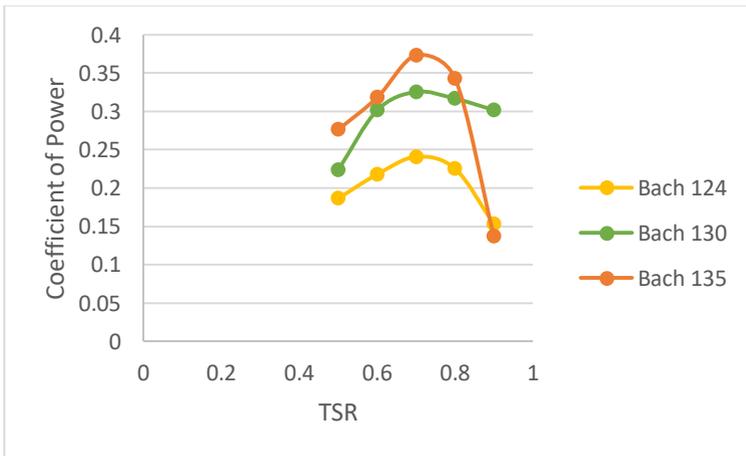
Pada grafik diatas terlihat membentuk trendline yang naik dari TSR 0.2 sampai 0.6 dan 0.7 lalu akan turun pada TSR 0.8 dan 0.9. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa koefisien torsi yang dihasilkan oleh turbin Bach 135° memiliki nilai maksimum sebesar 0.53332 pada TSR 0.7 dan memiliki nilai minimum sebesar 0.15202 pada TSR 0.9. Pada turbin Bach 130° didapatkan nilai koefisien torsi maksimum sebesar 0.50223 pada TSR 0.6 dan memiliki nilai minimum sebesar 0.335292 pada TSR 0.9. Pada

turbin Bach 124⁰ didapatkan nilai koefisien torsi maksimum sebesar 0.363033 pada TSR 0.6 dan memiliki nilai minimum sebesar 0.169753 pada TSR 0.9.

Dari penjelasan tersebut, bisa disimpulkan bahwa turbin Bach 135⁰ memiliki nilai koefisien torsi yang paling besar daripada turbin lainnya yaitu sebesar 0.539366 pada TSR 0.7.

4.4 Koefisien Power VS Tip Speed Ratio

Pada sub bab kali ini akan membahas perbandingan nilai koefisien power pada Bach dengan sudut busur sudu 135⁰, 130⁰ dan 124⁰ pada Tip Speed Ratio sebesar 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 dan 0.9.



Gambar 4. 5 Koefisien Power vs Tip Speed Ratio

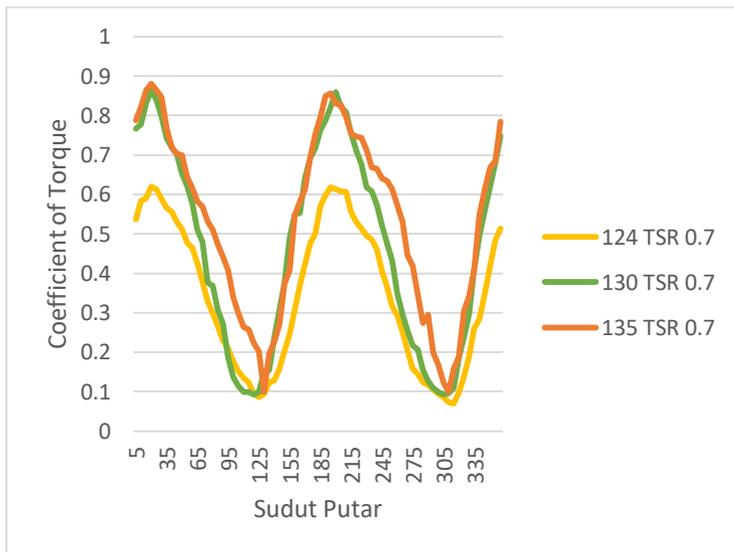
Grafik diatas menunjukkan trendline yang naik dari TSR 0.2 hingga TSR 0.7 lalu akan turun pada TSR 0.8 dan 0.9. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa pada turbin Bach 135⁰ memiliki nilai koefisien power maksimum sebesar 0.37332 pada TSR 0.7 dan memiliki nilai minimum pada TSR 0.9 sebesar 0.13681. Pada

turbin Bach 130° memiliki nilai koefisien power maksimum sebesar 0.326387 pada TSR 0.7 dan memiliki nilai minimum pada TSR 0.9 sebesar 0.301763. Pada turbin Bach 124° memiliki nilai koefisien power maksimum pada TSR 0.7 dengan nilai 0.242056 dan memiliki nilai minimum pada TSR 0.9 sebesar 0.152778.

Dari pembahasan diatas bisa disimpulkan bahwa dari ketiga turbin tersebut, turbin Bach 135° memiliki nilai koefisien power yang lebih besar dengan nilai 0.377556 pada TSR 0.7.

4.5 Koefisien Torsi VS Sudut Putar

Pada sub bab kali ini akan membahas perbandingan nilai koefisien torsi pada Bach dengan sudut busur sudu 135° , 130° dan 124° pada Tip Speed Ratio sebesar 0.7.



Gambar 4. 6 Koefisien Torsi VS Sudut Putar

Grafik diatas menunjukkan koefisien torsi pada Tip Speed Ratio 0.7 dibandingkan dengan sudut putar. Bisa dilihat bahwa

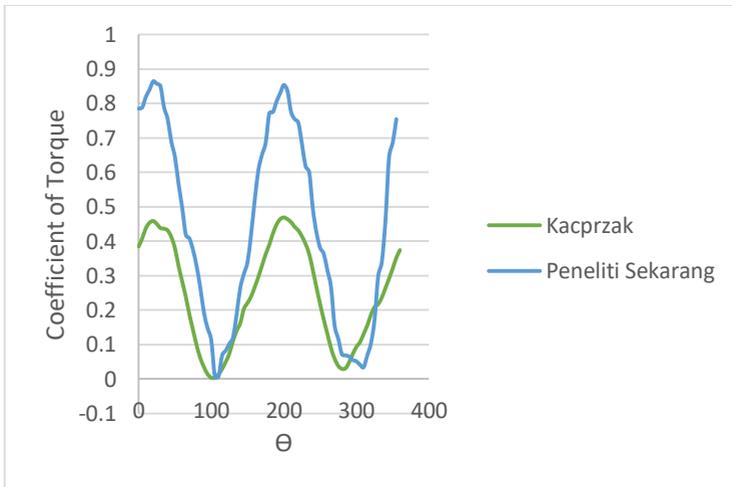
trendline grafik menunjukkan naik turun, dimana pada posisi awal 0° grafik menunjukkan trendline naik lalu menurun pada sekitar sudut putar $25^{\circ} - 135^{\circ}$ dan pada sudut putar $210^{\circ} - 305^{\circ}$, lalu akan kembali naik sekitar $140^{\circ} - 205^{\circ}$ dan 355°

4.6 Komparasi Dengan Penelitian Terdahulu

Pada sub bab kali ini akan dibahas komparasi penelitian sekarang dengan penelitian terdahulu. Komparasi akan dilakukan dengan penelitian Kacprzak (2014) dengan Zharfan (2019).

4.6.1 Komparasi Dengan Penelitian Kacprzak (2014)

Komparasi penelitian ini dilakukan pada turbin Bach dengan sudut busur sudu 135° dan pada Tip Speed Ratio 0.8. Berikut adalah grafik perbandingan hasil penelitian oleh Kacprzak (2014) dengan penelitian sekarang (2020).

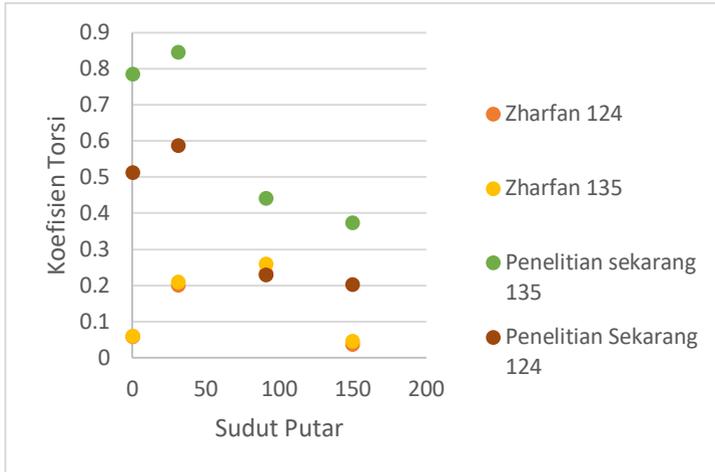


Gambar 4. 7 Penelitian Kacprzak (2014) dengan Peneliti Sekarang (2020)

Dari grafik diatas bisa dilihat bahwa hasil dari kedua penelitian memiliki trendline yang sama, yaitu dimulai dari trendline yang tinggi lalu menurun kemudian naik lagi seperti membentuk gelombang.

4.6.2 Komparasi Dengan Penelitian Zharfan (2019)

Pada penelitian yang dilakukan oleh Zharfan (2019) dilakukan pada turbin angin Savonius standar, tipe Bach dengan sudut busur sudu 124^0 dan 135^0 dimana variasi ini sama dengan yang dilakukan oleh penelitian sekarang (2020). Namun perbedaannya penelitian yang dilakukan oleh Zharfan (2019) dilakukan dalam keadaan statis sehingga output yang dimiliki yaitu koefisien torsi statis sedangkan pada penelitian sekarang dilakukan dalam keadaan dinamis atau turbin berputar. Berikut adalah komparasi koefisien torsi statis yang dihasilkan oleh Zharfan (2019) dengan koefisien torsi dinamis oleh penelitian sekarang (2020).



Gambar 4. 8 Grafik Komparasi Koefisien Torsi Statis Zharfan (2019) dengan Koefisien Torsi Dinamis Penelitian Sekarang (2020)

Pada grafik yang ditunjukkan gambar 4.8 bisa dilihat bahwa turbin Bach dengan sudut busur sudu 135° memiliki koefisien torsi statis dan dinamis yang lebih besar daripada turbin Bach dengan sudut busur sudu 124° .

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari simulasi yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Aliran yang mengalir pada turbin Bach 135^0 , 130^0 dan 124^0 pada saat $\theta = 0^0$, 20^0 , 90^0 dan 135^0 membentuk area wake yang bermacam-macam. Pada turbin Bach 135^0 dengan posisi $\theta = 135^0$ didapatkan area wake yang lebih besar daripada turbin Bach 130^0 dan 124^0 . Lebih besarnya area wake yang signifikan hanya terjadi pada sudu *advancing*, dengan lebih besarnya area wake pada sudu *advancing*. Selisih gaya drag antara sudu *advancing* dan sudu *returning* didapatkan pada turbin Bach 135^0 memiliki nilai yang lebih besar dan diikuti oleh turbin Bach 130^0 dan 124^0 .
2. Pembagian distribusi tekanan pada turbin Bach dengan sudut busur sudu 124^0 , 130^0 dan 135^0 didapatkan yang paling besar yaitu pada turbin Bach dengan sudut busur sudu 135^0 .
3. Nilai koefisien torsi yang paling besar dari semua variasi turbin didapatkan pada bentuk turbin tipe Bach 135^0 pada Tip Speed Ratio 0.7 dengan nilai 0.539366.
4. Dari didapaatkannya nilai koefisien torsi, maka didapatkan nilai koefisien power dari semua turbin. Dengan nilai koefisien tori maksimum pada turbin Bach 135^0 pada Tip Speed Ratio 0.7 dengan nilai 0.377556, lalu diikuti oleh turbin Bach 130^0 dengan nilai koefisien power sebesar 0.326387, dan yang terakhir oleh turbin Bach 124^0 dengan nilai koefisien power sebesar 0.242056.

5.2 Saran

Dari simulasi yang telah dilakukan dapat disarankan untuk penelitian selanjutnya adalah:

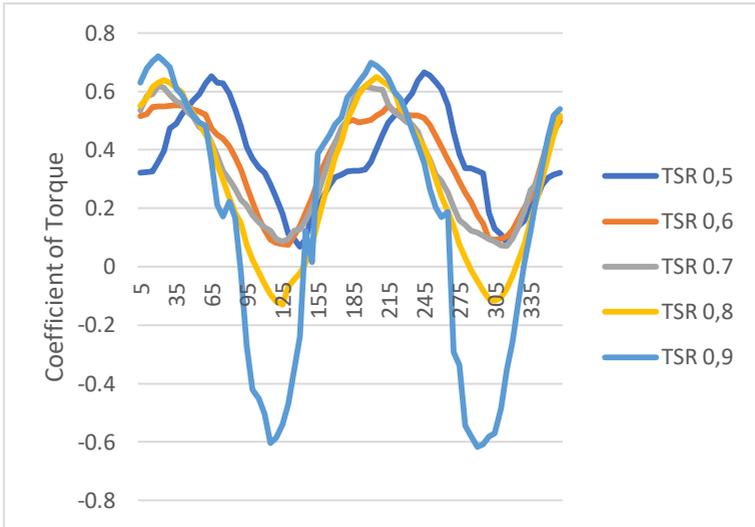
1. Simulasi pada Turbin Savonius Tipe Bach dengan sudut busur sudu 140° .

DAFTAR PUSTAKA

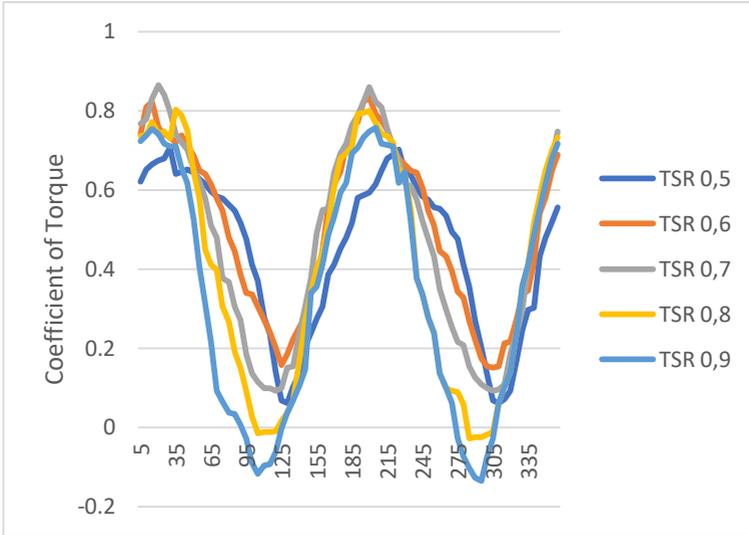
- Akwa J.A., Vielmo H.A., Petry A.P. 2012. *A Review on The Performance of Savonius Wind Turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 16, pp. 3054-3064.
- Kacprzak K., Liskiewicz G., Sobczak K. 2013. *Numerical Investigation of Conventional and Modified Savonius Wind Turbines. Journal of Renewable Energy* Vol. 60, pp. 578-585.
- Kamoji M., Kedare S., Prabhu S. 2009. *Experimental Investigations on Single Stage Modified Savonius Rotor. Applied Energy* Vol. 86 pp. 1064-1073.
- Tong Zhou, Dietmar Rempfer. 2013. *Numerical study of detailed flow field and performance of Savonius wind turbines, Renewable Energy* 51 373-381.
- Fox R.W., Pritchard P.J., McDonald A.T., 2010. *“Introduction to Fluid Mechanics 7th”*, John Wiley & Sons, Inc, Singapore.
- Zharfan F. 2019. *Studi Numerik Turbin Angin Savonius Sudu Standard Dan Sudu Bach Dengan Variasi Sudut Busur Sudu tugas Akhir Departemen Teknik Mesin ITS.*

(Halaman Sengaja Dikосongkan)

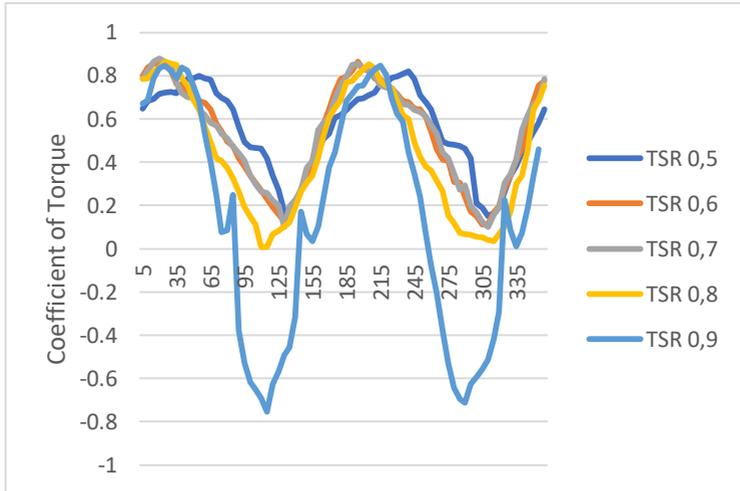
LAMPIRAN



Tabel 1 Grafik Koefisien Torsi VS θ Pada Turbin Bach Dengan Sudut Busur Sudu 124°



Tabel 2 Grafik Koefisien Torsi VS θ Pada Turbin Bach Dengan Sudut Busur Sudu 130°



Tabel 3 Grafik Koefisien Torsi VS θ Pada Turbin Bach Dengan Sudut Busur Sudu 135°

(Halaman Sengaja Dikосongkan)

BIODATA PENULIS



Adima Nabila Rahmah lahir di Malang, 05 Oktober 1998 merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Rahmad Basuki dan Ibu Uswatun Chasanah. Penulis mengawali Pendidikan pada jenjang Raudhatul Athfal (RA) Khoirul Huda, Kabupaten Sidoarjo lalu melanjutkan di Madrasah Ibtidaiyah (MI) Khoirul Huda pada tahun 2004-2010. Lalu penulis melanjutkan di Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 1 Sedati, Kabupaten Sidoarjo pada tahun 2010-2013. Setelah itu, penulis melanjutkan ke Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 1 Waru, Kabupaten Sidoarjo pada tahun 2013-2016. Penulis melanjutkan pendidikan perguruan tingginya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kota Surabaya pada tahun 2016 di Departemen Teknik Mesin.

Semasa kehidupan perguruan tinggi, penulis aktif pada organisasi Himpunan Mahasiswa Mesin ITS sebagai Staf Hubungan Luar pada tahun 2017/2018 lalu dilanjutkan menjadi Sekertaris Departemen Hubungan Luar Himpunan Mahasiswa Mesin ITS pada tahun 2018/2019. Selain itu, penulis juga aktif sebagai anggota maupun asisten laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida. Penulis memiliki banyak pelajaran yang bisa diambil pada saat aktif sebagai mahasiswa, organisasi maupun asisten laboratorium. Untuk informasi, saran, dan kepentingan sehubungan dengan penelitian, penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik : nabilaadima12@gmail.com.