



TUGAS AKHIR - TM 091585

**STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN DARRIEUS
DENGAN VARIASI JUMLAH SUDU DAN
KECEPATAN ANGIN**

**RAHMAT TAUFIQURRAHMAN
NRP 2110 100 131**

**Dosen Pembimbing
Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT - TM 091585

**NUMERICAL STUDY OF DARRIEUS WIND
TURBINE WITH VARIATION OF THE NUMBER
OF BLADE AND WIND VELOCITY**

**RAHMAT TAUFIQURRAHMAN
NRP 2110 100 131**

Academic Advisor
Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D.

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**

**STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN DARRIEUS
DENGAN VARIASI JUMLAH SUDU DAN KECEPATAN
ANGIN**

TUGAS AKHIR

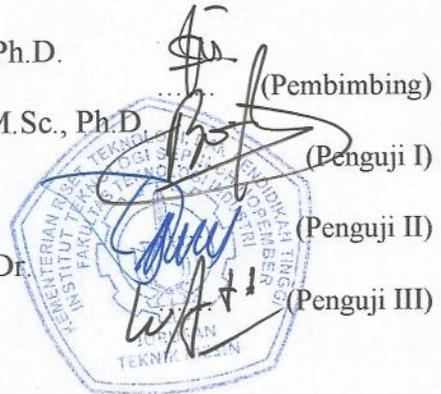
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

RAHMAT TAUFIQURRAHMAN
NRP. 2110 100 131

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Vivien Suphandani, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 198105292003122001 (Pembimbing)
2. Bambang Arip Dwiyantoro, ST., M.Sc., Ph.D.
NIP. 197804012002121001 (Penguji I)
3. Sutardi, Ir., M.Eng., Ph.D., Prof.
NIP. 196412281990031002 (Penguji II)
4. Wawan Aries Widodo, ST., MT., Dr.
NIP. 197104051997021001 (Penguji III)



SURABAYA
NOVEMBER, 2016

STUDI NUMERIK TURBIN ANGIN DARRIEUS DENGAN VARIASI JUMLAH SUDU DAN KECEPATAN ANGIN

Nama Mahasiswa : Rahmat Taufiqurrahman
NRP : 2110 100 131
Jurusan : Teknik Mesin FTI – ITS
Dosen Pembimbing: Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D.

Abstrak

Kebutuhan energi pada saat ini semakin meningkat. Bahan bakar fosil yang seringkali digunakan memiliki beberapa kerugian, seperti tidak terbarukan dan tidak ramah lingkungan. Angin menjadi salah satu alternatif sumber energi. Alat yang digunakan untuk mengekstraksi energi angin ini adalah turbin angin. Hal inilah yang mendasari penelitian ini agar didapatkan desain turbin angin yang mampu mengekstraksi tenaga angin seoptimal mungkin.

Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah studi numerik dua dimensi menggunakan software Star CCM+ 9.02.007-R8. Model 2D yang digunakan adalah turbin angin Darrieus tipe eggbeater dengan jumlah sudu 3 dan 4 sudu. Bentuk sudu yang dipakai mengikuti bentuk airfoil simetris NACA 0024. Turbulence modelling yang digunakan adalah realizable k-epsilon. Putaran poros bervariasi dengan kecepatan angin sebesar 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Boundary condition untuk inlet adalah velocity inlet, untuk outlet ialah flow-split outlet, dinding atas dan bawah sebagai symmetry plane, dan selebihnya menggunakan wall.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah data kualitatif berupa kontur kecepatan dan tekanan, serta data kuantitatif berupa nilai torsi dan koefisien daya. Turbin angin Darrieus tiga sudu memiliki koefisien daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Darrieus empat sudu dalam rentang TSR 1,08-1,28. Koefisien daya tertinggi yang dicapai turbin angin Darrieus tiga sudu adalah 0,437 pada TSR 1,28.

Kata Kunci: Studi Numerik, Turbin Angin, Darrieus, Torsi, Koefisien Daya, Visualisasi Aliran, Jumlah Sudu, Kecepatan Angin, Metode Komputasi Fluida, Simulasi, Unsteady, Putaran Turbin, Perbedaan Tekanan

NUMERICAL STUDY OF DARRIEUS WIND TURBINE WITH VARIATION OF THE NUMBER OF BLADE AND WIND VELOCITY

Student Name : Rahmat Taufiqurrahman
NRP : 2110 100 131
Departement : Mechanical Engineering, FTI – ITS
Supervising Lecturer : Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D.

Abstract

Energy needs at this time is increasing. Fossil fuels have many disadvantages, such as not renewable and environmentally unfriendly. Wind becoming an alternative source of energy. The device used to extract this wind energy is a wind turbine. This is what underlies this study in order to get wind turbine optimum design to extracting wind power optimally.

The method used in this study is a two-dimensional numerical studies using Star CCM + 9.02.007-R8 software. The 2D model used is the Darrieus wind turbine eggbeater type with number of blades 3 and 4. The blade geometry was depend on symmetrical airfoil NACA 0024. Turbulence modeling used in this simulation was k-epsilon realizable. Shaft rotational speeds varied with wind velocities of at 5, 7, 9, 11, 13, and 15 m/s. Boundary condition for inlet is velocity inlet, for outlet is flow-split outlet, the upper and lower walls as a symmetry plane, and the rest as wall.

The results obtained from this study is flow visualization such as velocity and pressure contours, as well as graphical data such as the value of the torque and power coefficient. Darrieus wind turbine with three blades has higher power coefficient compared to that with four blades in TSR ranges from 1.08 to 1.28. The highest coefficient of power achieved by the three blades Darrieus wind turbine is 0.437 on the TSR 1.28.

Keywords: Numerical Study, Wind Turbine, Darrieus, Torque, Power Coefficient, Flow Visualization, Number of

***Blade, Wind Velocity, Computational Fluid
Dynamics, Simulation, Unsteady, Rotation of
Turbine, Pressure Drop***

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan rahmat-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moral maupun material dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Kedua orang tua yang telah membesarkan, menasehati dan mendoakan penulis demi kelancaran kuliah, tugas akhir dan setiap perjalanan penulis.
2. Ibu Vivien Suphandani, ST, ME, Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan saran, motivasi dan ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terimakasih atas kesabarannya yang luar biasa dalam membimbing penulis.
3. Bapak Bambang Arip Dwiyanoro, S.T., M.Eng., Ph.D., Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T., dan Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih atas kritik dan saran yang telah diberikan.
4. R. Ay. Noer Septiana Sari dan keluarga besar yang selalu mendukung, mendoakan dan mendorong penulis untuk menyelesaikan tugas akhir. Terimakasih atas motivasinya yang luar biasa bagi penulis.
5. Semua warga Laboratorium Mekanika Fluida yang telah banyak membantu penulis.
6. Teman-teman Forkamp yang telah menemani dan menjadi wadah penulis dalam menyalurkan ide-ide.
7. Seluruh SMRM yang telah membantu perkembangan positif akademik dan moral penulis.
8. Seluruh dosen dan karyawan jurusan Teknik Mesin ITS.

9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan pada kesempatan kali ini oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, November 2016

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| LEMBAR PENGESAHAN | iii |
| ABSTRAK | v |
| ABSTRACT | vii |
| KATA PENGANTAR | ix |
| DAFTAR ISI | xi |
| DAFTAR GAMBAR | xv |
| DAFTAR TABEL | xxi |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. LATAR BELAKANG..... | 1 |
| 1.2. RUMUSAN MASALAH | 2 |
| 1.3. TUJUAN PENELITIAN | 2 |
| 1.4. BATASAN MASALAH | 3 |
| 1.5. MANFAAT | 3 |
| BAB II STUDI LITERATUR DAN DASAR TEORI | 5 |
| 2.1. STUDI LITERATUR..... | 5 |
| 2.1.1. Gorle et al. (2016) | 5 |
| 2.1.2. Hassan et al. (2015)..... | 9 |
| 2.1.3. Dwiyantoro et al. (2015)..... | 13 |
| 2.1.4. Brusca et al. (2014) | 16 |
| 2.2. DASAR TEORI..... | 19 |
| 2.2.1. Energi Angin..... | 19 |
| 2.2.2. Potensi Tenaga Angin..... | 20 |

| | |
|--|----|
| 2.2.3. Turbin Angin Sumbu Vertikal | 22 |
| 2.2.4. Turbin Angin Darrieus..... | 23 |
| 2.2.5. Teori Betz | 25 |
| 2.2.6. Koefisien Daya & Torsi..... | 30 |
| 2.2.7. <i>Tip Speed Ratio</i> | 31 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 33 |
| 3.1. VARIASI DAN <i>DOMAIN</i> SIMULASI..... | 33 |
| 3.1.1. Variasi | 33 |
| 3.1.2. <i>Domain</i> Simulasi | 33 |
| 3.2. TAHAP <i>PRE-PROCESSING</i> | 33 |
| 3.2.1. Pembuatan Geometri, <i>Grid Independency Test & Meshing</i> | 33 |
| 3.2.2. <i>Boundary Conditions</i> | 37 |
| 3.2.3. Parameter Pemodelan | 38 |
| 3.2.3.1 <i>Models</i> | 38 |
| 3.2.3.2 <i>Materials</i> | 39 |
| 3.2.3.3 <i>Rotation Motion</i> | 39 |
| 3.3. TAHAP <i>PROCESSING</i> | 39 |
| 3.4. TAHAP <i>POST PROCESSING</i> | 40 |
| 3.5. DIAGRAM ALIR | 41 |
| BAB IV ANALISIS DAN DISKUSI | 45 |
| 4.1. PUTARAN TURBIN DAN <i>TIP SPEED RATIO</i> | 45 |
| 4.2. <i>TIME STEP</i> | 45 |
| 4.3. ANALISIS KONTUR | 46 |

| | |
|---|-----------|
| 4.3.1. Kontur Kecepatan..... | 47 |
| 4.3.2. Kontur Tekanan..... | 57 |
| 4.4. ANALISIS TORSI..... | 65 |
| 4.4.1. Torsi Pada Tiap Sudut Putar | 65 |
| 4.4.2. Torsi Rata-rata Pada Tiap Kecepatan Angin..... | 73 |
| 4.5. KOEFISIEN DAYA..... | 75 |
| BAB V PENUTUP | 79 |
| 4.1. KESIMPULAN..... | 79 |
| 4.2. REKOMENDASI..... | 80 |
| DAFTAR PUSTAKA | 83 |
| LAMPIRAN | 85 |
| TENTANG PENULIS..... | 87 |

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2.1. Visualisasi <i>mesh</i> yang digunakan pada studi numerik (Gorle et al, 2016) | 6 |
| Gambar 2.2. Turbin dan <i>towing tank</i> yang digunakan pada metode eksperimen (Gorle et al, 2016)..... | 7 |
| Gambar 2.3. Visualisasi medan <i>vortex</i> dan torsi yang terjadi pada berbagai sudut putar turbin pada studi numerik dan eksperimen (Gorle et al, 2016)..... | 8 |
| Gambar 2.4. Grafik koefisien daya vs TSR dengan membandingkan nilai yang didapat menggunakan metode numerik dan eksperimen (Gorle et al, 2016) | 8 |
| Gambar 2.5. Grafik koefisien daya vs TSR pada studi numerik dengan variasi nilai kecepatan <i>freestream</i> (Gorle et al, 2016)..... | 9 |
| Gambar 2.6. Koordinat putaran sudu (Hassan et al, 2015) | 10 |
| Gambar 2.7. Skema domain rotor 3 sudu turbin angin VAWT (Hassan et a., 2015)..... | 11 |
| Gambar 2.8. Contoh <i>mesh</i> 2D yang digunakan pada turbin angin VAWT (Hassan et al, 2015) | 12 |
| Gambar 2.9. <i>Mesh</i> disekitar sudu NACA 0021 (Hassan et al, 2015) | 12 |

| | |
|--|----|
| Gambar 2.10. Grafik koefisien daya vs TSR dengan panjang <i>chord</i> 85,6 mm (Hassan et al, 2016) | 12 |
| Gambar 2.11. Pengaruh <i>solidity</i> dan jumlah sudu terhadap nilai koefisien daya dengan panjang <i>chord</i> 85,6 mm (Hassan et al, 2016)..... | 13 |
| Gambar 2.12. Pengaruh <i>solidity</i> dan jumlah sudu terhadap TSR pada koefisien daya maksimal dengan panjang <i>chord</i> 85,6 mm (Hassan et al, 2016) | 13 |
| Gambar 2.13. <i>Layout</i> turbin angin Darrieus-Savonius (Dwiyantoro et al, 2015)..... | 14 |
| Gambar 2.14. Grafik kecepatan angin terhadap putaran turbin angin (Dwiyantoro et al, 2015)..... | 15 |
| Gambar 2.15. Grafik koefisien daya turbin angin terhadap TSR (Dwiyantoro et al, 2015)..... | 15 |
| Gambar 2.16.a – d. Grafik koefisien daya vs <i>angle of attack</i> pada Re yang bervariasi..... | 17 |
| Gambar 2.17. Efek <i>aspect ratio</i> (h/R) pada turbin angin sumbu vertikal..... | 18 |
| Gambar 2.18. Efek <i>aspect ratio</i> pada Reynolds number (Re) dengan variasi power yang diberikan..... | 18 |
| Gambar 2.19. Efek <i>aspect ratio</i> pada kecepatan putar (n) dengan variasi power yang diberikan..... | 19 |
| Gambar 2.20. Varian turbin angin sumbu vertical..... | 22 |

| | |
|---|----|
| Gambar 2.21. Turbin Angin Darrieus VAWT Tipe <i>Eggbeater</i> (atau <i>Curved Bladed</i>) | 24 |
| Gambar 2.22. Turbin Angin Darrieus VAWT Tipe <i>Straight- bladed</i> | 25 |
| Gambar 2.23. Turbin Angin Darrieus VAWT Tipe H-Rotor | 25 |
| Gambar 2.24. Kondisi aliran angin akrobat ekstraksi energi mekanik aliran bebas | 26 |
| Gambar 2.25. Grafik koefisien daya terhadap rasio kecepatan aliran angin | 29 |
| Gambar 2.26. Grafik koefisien daya terhadap <i>tip speed ratio</i> | 32 |
| Gambar 3.1. Spesifikasi geometri <i>static domain</i> turbin angin Darrieus tiga sudu | 34 |
| Gambar 3.2. Spesifikasi geometri <i>rotating domain</i> turbin angin Darrieus tiga sudu | 35 |
| Gambar 3.3. Torsi yang dihasilkan oleh 2 <i>mesh</i> dengan jumlah <i>cell</i> yang berbeda | 36 |
| Gambar 3.4. <i>Meshing</i> turbin angin Darrieus tiga sudu | 36 |
| Gambar 3.5. Perbesaran gambar <i>meshing</i> turbin angin Darrieus tiga sudu di daerah <i>rotating domain</i> | 37 |
| Gambar 3.6. <i>Boundary conditions</i> pada turbin angin Darrieus tiga sudu pada daerah <i>static domain</i> | 38 |
| Gambar 3.7. <i>Boundary conditions</i> pada turbin angin Darrieus tiga sudu pada daerah <i>rotating domain</i> | 38 |

| | |
|--|----|
| Gambar 3.8. (a) <i>Setting Rotation Motions</i> dan (b) <i>setting body</i> yang diputar | 40 |
| Gambar 3.9. Diagram Alir Penelitian Umum..... | 41 |
| Gambar 3.10. Diagram alir simulasi numerik | 43 |
| Gambar 4.1. Analisa gaya-gaya yang bekerja pada sudu turbin angin Darrieus pada sudut putar tertentu (Brusca et al, 2014)..... | 47 |
| Gambar 4.2. Skema turbin angin Darrieus tiga sudu | 49 |
| Gambar 4.3. Kontur kecepatan turbin angin Darrieus tiga sudu pada berbagai sudut putar dengan kecepatan <i>freestream</i> 15 m/s..... | 50 |
| Gambar 4.4. Vektor kecepatan yang menunjukkan kemunculan <i>vortex</i> pada sudu 1 turbin angin Darrieus tiga sudu pada kecepatan <i>freestream</i> 15 m/s | 51 |
| Gambar 4.5. Kontur kecepatan turbin angin Darrieus tiga sudu pada sudut putar $\theta = 90^\circ$ dengan variasi kecepatan <i>freestream</i> | 52 |
| Gambar 4.6. Skema turbin angin Darrieus empat sudu..... | 54 |
| Gambar 4.7. Kontur kecepatan turbin angin Darrieus empat sudu pada berbagai sudut putar dengan kecepatan <i>freestream</i> 15 m/s..... | 55 |
| Gambar 4.8. Kontur kecepatan turbin angin Darrieus empat sudu pada sudut putar $\theta = 0^\circ$ dengan variasi kecepatan <i>freestream</i> | 56 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.9. Kontur tekanan turbin angin Darrieus tiga sudu pada berbagai sudut dengan kecepatan <i>freestream</i> 15 m/s | 58 |
| Gambar 4.10. Kontur tekanan turbin angin Darrieus tiga sudu pada sudut putar $\theta = 90^\circ$ dengan variasi kecepatan angin <i>freestream</i> | 60 |
| Gambar 4.11. Kontur tekanan turbin angin Darrieus empat sudu pada berbagai sudut dengan kecepatan <i>freestream</i> 15 m/s..... | 62 |
| Gambar 4.12. Kontur tekanan turbin angin Darrieus empat sudu pada sudut putar $\theta = 0^\circ$ dengan variasi kecepatan <i>freestream</i> | 64 |
| Gambar 4.13. Komparasi kontur tekanan turbin angin Darrieus tiga sudu dan empat sudu pada sudut putar 90° dengan kecepatan <i>freestream</i> 15 m/s | 65 |
| Gambar 4.14. Grafik torsi terhadap sudut putar sudu 1 pada turbin angin Darrieus tiga sudu dengan variasi kecepatan <i>freestream</i> | 67 |
| Gambar 4.15. Grafik torsi terhadap sudut putar sudu 1 pada turbin angin Darrieus empat sudu dengan variasi kecepatan <i>freestream</i> | 68 |
| Gambar 4.16. (a) Grafik torsi terhadap sudut putar sudu 1, 2, 3 pada turbin angin Darrieus tiga sudu pada kecepatan <i>freestream</i> 15 m/s, (b) Grafik torsi total | |

| | | |
|--------------|---|----|
| | terhadap sudut putar turbin angin Darrieus tiga sudu dengan variasi kecepatan <i>freestream</i> , (c) Kontur tekanan + <i>freestream</i> turbin angin Darrieus tiga sudu $\theta = 205^\circ$, (d) Kontur tekanan + <i>freestream</i> turbin angin Darrieus tiga sudu $\theta = 270^\circ$ | 70 |
| Gambar 4.17. | (a) Grafik torsi terhadap sudut putar sudu 1, 2, 3, 4 pada turbin angin Darrieus empat sudu pada kecepatan <i>freestream</i> 15 m/s, (b) Grafik torsi total terhadap sudut putar turbin angin Darrieus empat sudu dengan variasi kecepatan <i>freestream</i> , (c) Kontur tekanan + <i>freestream</i> turbin angin Darrieus empat sudu $\theta = 95^\circ$, (d) Kontur tekanan + <i>freestream</i> turbin angin Darrieus empat sudu $\theta =$ 14..... | 73 |
| Gambar 4.18. | Komparasi grafik torsi total turbin angin Darrieus 3 sudu dan 4 sudu terhadap sudut putar pada kecepatan <i>freestream</i> 15 m/s. | 74 |
| Gambar 4.19. | Grafik torsi terhadap kecepatan angin turbin angin Darrieus tiga sudu dan empat sudu..... | 74 |
| Gambar 4.20. | Grafik koefisien daya terhadap TSR turbin angin Darrieus tiga sudu dan empat sudu..... | 76 |
| Gambar 4.21. | Komparasi nilai $C_{p,max}$ pada penelitian Hassan et al (2015) dengan penelitian saat ini | 77 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1. Geometri yang digunakan pada model yang diujikan (Hassan et al, 2015)..... | 10 |
| Tabel 2.2. Ukuran <i>mesh</i> pada model yang diujikan (Hassan et al, 2015) | 11 |
| Tabel 2.3. Tingkatan kecepatan angin 10 meter di atas permukaan tanah..... | 21 |
| Tabel 3.1. Variasi jumlah sudu dan kecepatan angin yang digunakan | 33 |
| Tabel 4.1. Data yang Digunakan dalam Simulasi..... | 45 |
| Tabel 4.2. <i>Time step</i> tiap kecepatan angin..... | 46 |

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Pertumbuhan penduduk merupakan salah satu faktor penyebab meningkatnya kebutuhan akan energi. Akan tetapi, meningkatnya kebutuhan energi ini diiringi dengan menurunnya jumlah sumber energi yang ada seperti batu bara, gas alam dan minyak bumi. Sebagaimana kita tahu, sumber energi ini kurang ramah lingkungan dan lama kelamaan akan habis karena tidak *renewable*. Oleh karena itu diperlukan solusi untuk mengatasi keterbatasan ini yaitu dengan mencari alternatif sumber energi yang terbarukan (*renewable*) dan ramah lingkungan, sehingga bisa dimanfaatkan secara luas dan terus-menerus (*continue*).

Salah satu sumber energi yang terbarukan dan ramah lingkungan adalah tenaga angin. Potensi pemanfaatan tenaga angin ini menjadi pembangkit listrik sangat besar, khususnya di pesisir pantai Indonesia. Kecepatan angin rata-rata di Indonesia mencapai 5 m/s dan dengan kecepatan ini, listrik yang dihasilkan bisa mencapai 100kW. Namun karena kondisi geografis Indonesia yang beragam, menjadikan kecepatan angin tidak stabil dan arahnya tidak menentu. Hal ini menjadi masalah utama dalam pembangunan pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia. Oleh karena itu, perlu adanya modifikasi dan penelitian lebih lanjut terhadap model turbin angin yang cocok dengan kondisi di Indonesia ini.

Salah satu tipe turbin angin yang sering digunakan adalah turbin angin Darrieus dengan poros vertikal. Kelebihan utama dari turbin angin jenis ini adalah mampu menerima angin dari segala arah, biaya perawatannya yang lebih murah dari turbin angin tipe lainnya dan cocok digunakan pada pesisir pantai, seperti di daerah suramadu. Daerah suramadu memiliki potensi angin yang cukup baik, dikarenakan pengaruh dari angin lokal yang cukup besar yang terjadi akibat perbedaan suhu lokal antara sifat fisis daratan dan lautan.

Turbin angin di daerah suramadu ini dapat dimanfaatkan untuk memberikan daya pada lampu penerang jembatan suramadu, sehingga lebih menghemat biaya perawatan jembatan suramadu itu sendiri. Penelitian turbin angin Darrieus ini telah banyak dilakukan dan dimodifikasi untuk memberikan hasil yang diinginkan, misalnya saja menambah jumlah sudu, mendesain bentuk sudu yang sesuai, mengkondisikan besar *angle of attack* dan lain sebagainya. Beberapa peneliti sebelumnya adalah Gorle et al. (2016), Hassan et al. (2015) dan Dwiyantoro et al. (2013).

Pada penelitian kali ini, penulis akan melakukan studi numerik dengan model mini turbin Darrieus dengan tipe sudu simetris (NACA 0024), menggunakan variasi 3 sudu dan 4 sudu dengan pemodelan 2D serta variasi kecepatan angin *freestream* yang masuk, sehingga didapat nilai torsi dan power yang optimum agar dihasilkan energi listrik yang optimum pula.

1.2. RUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang mendasari studi numerik ini adalah:

1. Bagaimanakah memanfaatkan kecepatan angin yang bervariasi sehingga mampu dimanfaatkan menjadi sumber energi?
2. Apakah yang menyebabkan perbedaan torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus 3 sudu dengan 4 sudu?

1.3. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui kontur kecepatan dan tekanan yang melalui turbin angin Darrieus.
2. Mengetahui pengaruh jumlah sudu dalam studi numerik turbin angin tipe Darrieus terhadap kinerjanya.
3. Menganalisa torsi dan koefisien daya yang dihasilkan dari studi numerik ini.

1.4. BATASAN MASALAH

Pada studi numerik ini terdapat beberapa batasan masalah sesuai dengan lingkup dan area penelitian, yaitu:

1. Studi numerik dilakukan hanya pada penampang 2D.
2. Turbin angin tipe Darrieus yang digunakan adalah turbin angin dengan bentuk sudu melengkung (*eggbeater*), dengan profil airfoil sudu sesuai NACA 0024.
3. Aliran fluida diasumsikan *incompressible* dan *unsteady* pada daerah *rotating domain*.
4. Software yang digunakan adalah STAR-CCM+ 9.02.007-R8.
5. Support / penyangga sudu diabaikan.
6. Potongan penampang yang digunakan adalah bagian tengah dari turbin angin, yaitu bagian dengan jarak sudu dan poros terjauh.
7. Putaran turbin disimulasikan sebagai *rotation motion*.
8. Data kecepatan angin yang digunakan diasumsikan satu arah yaitu dari arah inlet dan diasumsikan konstan saat melalui inlet.
9. Aspek meteorologi dan kondisi lingkungan sekitar tidak dibahas secara detail pada pembahasan.
10. Studi numerik tidak mengikutsertakan analisa bahan yang dipakai pada turbin angin ini.

1.5. MANFAAT

Manfaat yang diharapkan dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Menggunakan software dalam proses studi numerik ini, sehingga lebih menghemat biaya yang dikeluarkan.
2. Meningkatkan taraf hidup masyarakat sekitar dengan turbin angin.
3. Dapat dijadikan referensi untuk membuat desain turbin yang sebenarnya dengan ukuran yang real, atau untuk membuat desain turbin yang lebih baik.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

STUDI LITERATUR DAN DASAR TEORI

2.1. STUDI LITERATUR

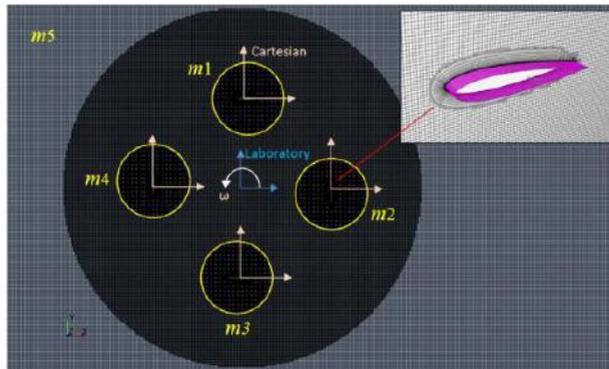
2.1.1. Gorle et al. (2016)

Penelitian yang dilakukan oleh Gorle et al. (2016) adalah untuk mengetahui performa dan evaluasi aliran pada turbin angin-aliran rendah tipe Darrieus. Metode yang dipakai pada penelitian ini adalah metode komputasi (2D CFD) menggunakan software komersial Star CCM+ dalam pemodelan, meshing dan simulasi numeriknya, dan metode eksperimen dengan menggunakan PIV (Particle image velocimetry, sebuah metode yang digunakan untuk mengukur kecepatan pada suatu fluida).

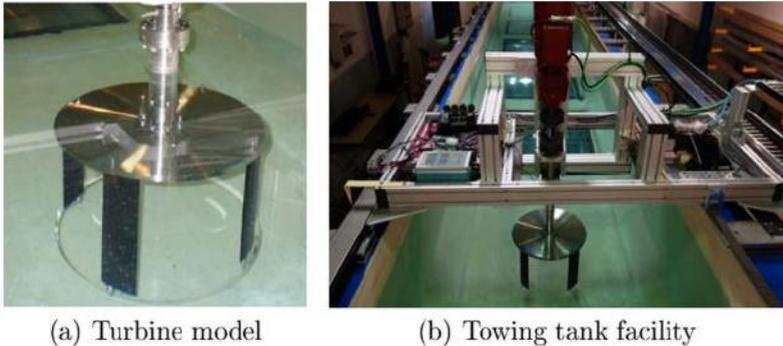
Pada metode komputasi, model geometri yang digunakan pada *vertical axis turbine* ini adalah sistem turbin 4 sudu. Kemudian dipilih sudu tipe NACA 0015 karena memiliki bentuk yang mudah dibuat, agar mudah pula dalam fabrikasi *prototype* turbin angin ini yang akan digunakan dalam metode selanjutnya (eksperimen), dengan kepadatan model turbin yang digunakan sebesar 0.533. Domain dari komputasi ini berbentuk persegi panjang, dimana panjangnya 15D dengan jarak ke daerah *upstream* turbin sebesar 5D ($D = \text{rotor diameter}$). Kemudian lebar domainnya sebesar 1.5 meter sesuai dengan lebar *towing tank* yang dipakai untuk eksperimen nantinya. Ukuran domain yang besar ini dibuat untuk memastikan aliran yang melaluinya mengalir dengan baik tanpa adanya aliran balik selama simulasi berlangsung. Untuk semua simulasi, putaran turbin di set berlawanan arah jarum jam, dengan kondisi aliran masuk yang diset sebagai *constant velocity* dan kondisi keluaran alirannya diset sebagai *pressure outlet*, serta *no-slip wall boundaries* yang diterapkan pada semua sudu yang digunakan.

Mesh yang digunakan pada studi numerik ini adalah model *Chimera technique*. Teknik ini merupakan bagian dari metode dekomposisi Schwartz dengan menggunakan interpolasi *Chimera* untuk menyederhanakan simulasi agar mampu menangani gerak relatif yang mengalir melalui geometri yang kompleks dengan

gerakan yang dinamis. Total *cell* pada tiap daerah sudunya adalah 29.657 dan pada daerah domainnya sejumlah 320.985. visualisasi *mesh* yang digunakan pada simulasi ini dapat dilihat pada gambar 2.1. Untuk instalasi metode eksperimen, dibuatlah model turbin dengan 4 sudu dengan panjang penampang melintang setiap sudunya 0,4 m menggunakan model NACA 0015. Diameter rotornya sebesar 0,6 m dengan *chord* sudu sepanjang 8 cm. *Flange* bagian atas dibuat menggunakan bahan *stainless steel* dan *flange* bagian bawah menggunakan bahan Polymethylmethacrylate (PMMA), yang memungkinkan kamera untuk menangkap pergerakan aliran disekitar sudu. Gambar 2.2a menunjukkan model turbin yang digunakan pada eksperimen ini. Kemudian model turbin ini diletakkan pada *towing tank* dengan panjang 20 m, lebar 1,5 m dan kedalaman 1,3 m seperti pada gambar 2.2b. *Towing tank* ini memiliki sisi yang transparan dan dinding bagian bawah yang memungkinkan sinar laser dan alat PIV menangkap fenomena yang terjadi dengan baik. Eksperimen ini dilakukan pada kisaran nilai TSR 0.5 - 5 dan kecepatan aliran *freestream* sebesar 0,5 m/s hingga 1.5 m/s.

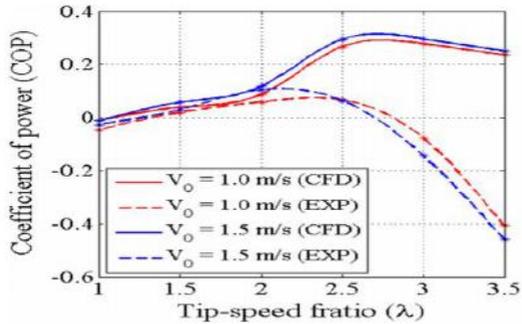


Gambar 2.1. Visualisasi *mesh* yang digunakan pada studi numerik (Gorle et al, 2016)

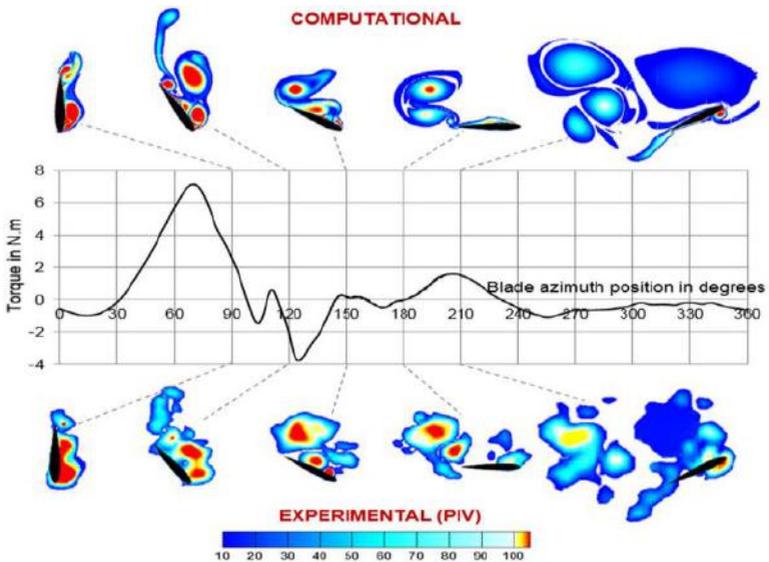


Gambar 2.2. Turbin dan *towing tank* yang digunakan pada metode eksperimen (Gorle et al, 2016)

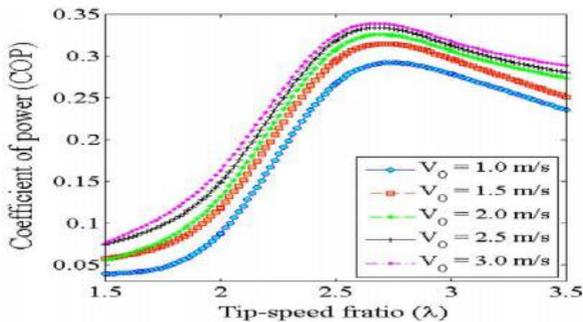
Beberapa hasil yang diperoleh dari studi numerik dan eksperimen yang dilakukan oleh Gorle et al. (2016) ini adalah grafik koefisien daya vs TSR dengan membandingkan nilai yang didapat menggunakan metode numerik dengan eksperimen (gambar 2.3), penampakan medan *vortex* pada berbagai sudut putar sekaligus torsi yang didapatkan (gambar 2.4), dan grafik koefisien daya vs TSR pada studi numerik dengan variasi nilai kecepatan *freestream* (gambar 2.5). Pada gambar 2.3 terlihat bahwa grafik koefisien daya yang didapat melalui metode numerik lebih tinggi daripada nilai koefisien daya yang didapat melalui metode eksperimen. Hal ini disebabkan karena metode numerik hanya dilakukan pada penampang 2D sedangkan metode eksperimen dilakukan pada kondisi 3D, sehingga metode numerik tidak menangkap efek yang ditimbulkan pada penampang 3D. Pada gambar 2.5 terlihat bahwa semakin tinggi kecepatan *freestream* maka nilai koefisien daya yang didapat juga semakin tinggi.



Gambar 2.3. Grafik koefisien daya vs TSR dengan membandingkan nilai yang didapat menggunakan metode numerik dan eksperimen (Gorle et al, 2016)



Gambar 2.4. Visualisasi medan *vortex* dan torsi yang terjadi pada berbagai sudut putar turbin pada studi numerik dan eksperimen (Gorle et al, 2016)

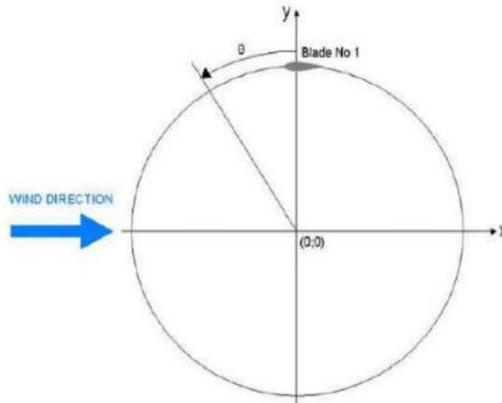


Gambar 2.5. Grafik koefisien daya vs TSR pada studi numerik dengan variasi nilai kecepatan *freestream* (Gorle et al, 2016)

2.1.2. Hassan et al. (2015)

Penelitian yang dilakukan Hassan et al. (2015) adalah untuk mengetahui pengaruh jumlah sudu dan panjang *chord* sudu terhadap efisiensi turbin angin Darrieus tipe melintang. Untuk melakukannya, dibuatlah 12 model dengan variasi jumlah sudu dan panjang *chord* sudu untuk menganalisa efek yang ditimbulkan dan hubungannya dengan performa turbin angin Darrieus. Analisa ini menggunakan metode komputasi fluida dinamis (CFD) pada penampang 2D, dengan model *k-epsilon turbulence* yang dipilih untuk melakukan simulasi *transient* dan *multiple reference frame* (MRF) untuk mendapatkan data *output* daya yang dihasilkan turbin angin ini. Model sudu yang digunakan adalah NACA 0021.

Penelitian ini menggunakan kecepatan angin konstan sebesar 9 m/s dengan kecepatan angular yang berbeda-beda. Beberapa ciri-ciri utama yang digunakan pada simulasi model turbin angin ini dapat dilihat pada tabel 2.1. *Solidity* pada tabel tersebut dapat dihitung dengan rumus $\sigma = \frac{Nc}{2R}$, dimana N adalah jumlah sudu pada turbin, c adalah panjang *chord* sudu, dan R adalah jari-jari turbin. Posisi *azimuth* rotor diidentifikasi sebagai koordinat angular dari pusat tekanan pada blade no. 1 (sekitar 0,25 dari panjang *chord* sudu) seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Koordinat putaran sudu (Hassan et al, 2015)

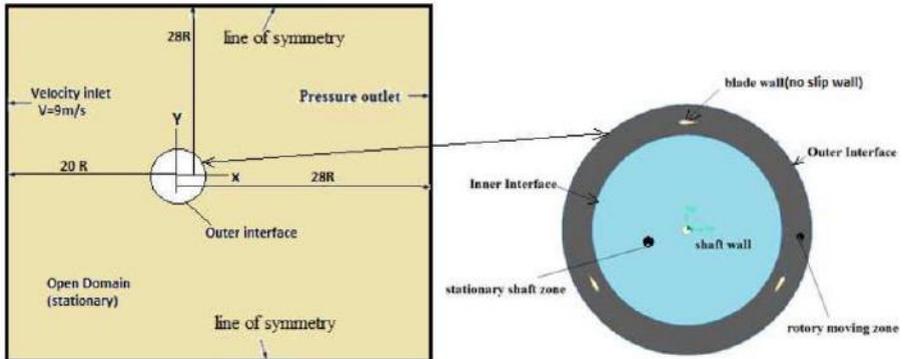
Tabel 2.1. Geometri yang digunakan pada model uji (Hassan et al, 2015)

| Features | Models | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------------------|-------|------|-----|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Drotor [mm] | 1030 | | | | | | | | | | | |
| Hrotor [m] | 1 (2D simulation) | | | | | | | | | | | |
| Blade profile | NACA 0021 | | | | | | | | | | | |
| c [mm] | 85.8 | 128.7 | 85.8 | 170 | 85.8 | 170 | 64.35 | 85.8 | 170 | 42.9 | 250 | 300 |
| Solidity σ | 0.17 | 0.25 | 0.25 | 0.5 | 0.33 | 0.66 | 0.25 | 0.5 | 0.99 | 0.25 | 0.48 | 0.87 |
| Number of blades(n) | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 2 | 3 |

Boundary condition yang digunakan pada *Inlet* model ini yaitu *velocity inlet*, sedangkan *outlet* nya diset sebagai *pressure outlet*. Kondisi *Symmetry plane* digunakan pada kedua sisi dinding atas dan bawah. *Domain* yang digunakan berbentuk persegi, dengan spesifikasi yang dapat dilihat pada gambar 2.7. Daerah *domain* dan daerah *shaft* diperlakukan diam, sedangkan daerah rotor diperlakukan berputar. *Mesh* yang digunakan adalah tipe *hexahedral*. Model turbulensi yang digunakan pada penelitian ini adalah *Realizable k-epsilon turbulence* dengan *standard wall function*. Contoh *mesh* yang digunakan pada model 2D ini dapat dilihat pada gambar 2.8 dan 2.9, sedangkan setting *mesh* yang digunakan dapat dilihat pada tabel 2.2. *Tip speed ratio* (λ) yang digunakan divariasikan dari nilai $\lambda=1,44$ (dengan nilai *angular velocity* nya $\omega=25,1$ rad/s) hingga $\lambda=3,3$ (dengan nilai *angular velocity* nya $\omega=57,6$ rad/s). Nilai kecepatan aliran *freestream* dibuat konstan sebesar 9 m/s.

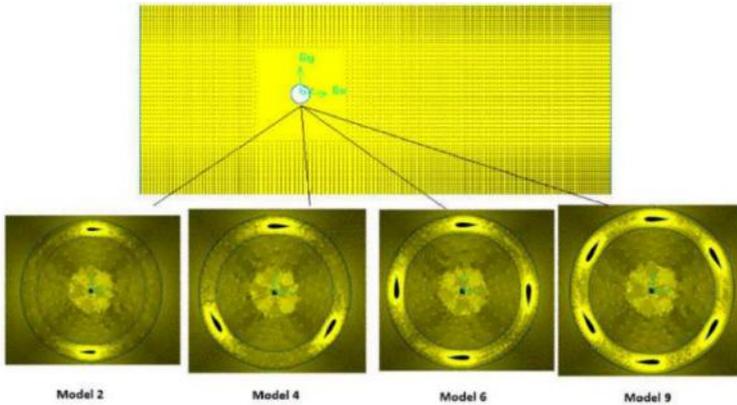
Tabel 2.2. Ukuran *mesh* pada model yang diujikan (Hassan et al, 2015)

| Features | Models | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Number of elements(n) | 148888 | 155487 | 149125 | 177107 | 163969 | 191154 | 158166 | 185383 | 223009 | 161255 | 155955 | 179636 |
| Blade Size Element [mm] | 0.71 | | | | | | | | | | | |
| Growth rate | 1.1 | | | | | | | | | | | |

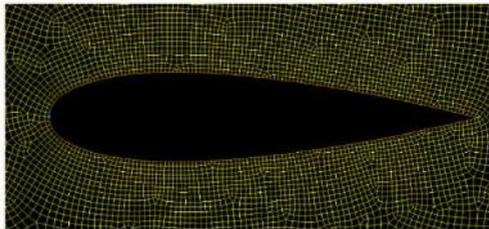


Gambar 2.7. Skema domain rotor 3 sudu turbin angin VAWT (Hassan et al, 2015)

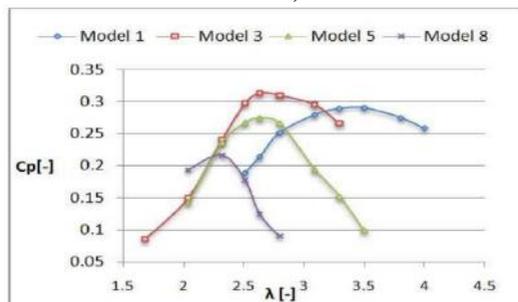
Beberapa hasil yang diperoleh pada penelitian Hassan et al. (2015) ini yaitu grafik yang menunjukkan hubungan antara jumlah sudu dan *solidity* terhadap koefisien daya yang dihasilkan. Grafik koefisien daya dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.10, 2.11, dan 2.12. Melalui gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa koefisien torsi maksimum akan meningkat seiring dengan meningkatnya *solidity* dan jumlah sudu untuk jumlah sudu ≤ 3 , dan koefisien torsi maksimum akan menurun seiring dengan meningkatnya *solidity* dan jumlah sudu untuk jumlah sudu ≥ 3 . Kesimpulan lainnya yaitu nilai TSR pada koefisien daya maksimal akan menurun seiring dengan bertambahnya *solidity* dan jumlah sudu turbin. Analisa ini dilakukan pada sudu dengan panjang *chord* 85,6 mm. Terlihat pada grafik bahwa turbin angin dengan sudu 3 memiliki koefisien daya yang maksimal.



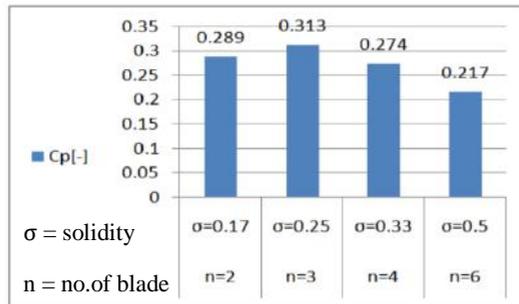
Gambar 2.8. Contoh *mesh* 2D yang digunakan pada turbin angin VAWT (Hassan et al, 2015)



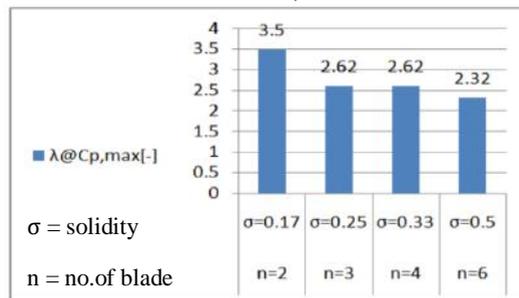
Gambar 2.9. *Mesh* disekitar sudu NACA 0021 (Hassan et al, 2015)



Gambar 2.10. Grafik koefisien daya vs TSR dengan panjang *chord* 85,6 mm (Hassan et al, 2016)



Gambar 2.11. Pengaruh *solidity* dan jumlah sudu terhadap nilai koefisien daya dengan panjang *chord* 85,6 mm (Hassan et al, 2016)



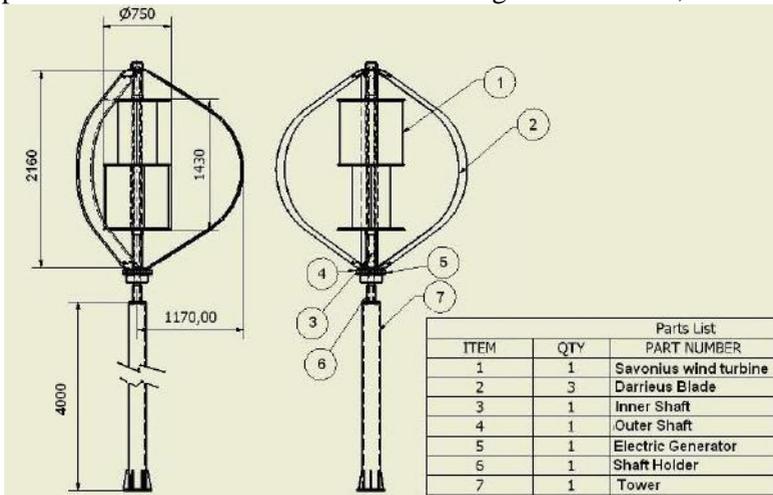
Gambar 2.12. Pengaruh *solidity* dan jumlah sudu terhadap TSR pada koefisien daya maksimal dengan panjang *chord* 85,6 mm (Hassan et al, 2016)

2.1.3. Dwiyantoro et al. (2015)

Studi eksperimen pada turbin angin Darrieus-Savonius yang dilakukan oleh Dwiyantoro et al. (2015) ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik turbin angin Darrieus-Savonius sehingga dapat diketahui desain yang mampu menghasilkan daya optimal. Penampang turbin angin yang di desain pada eksperimen ini ditunjukkan pada gambar 2.13.

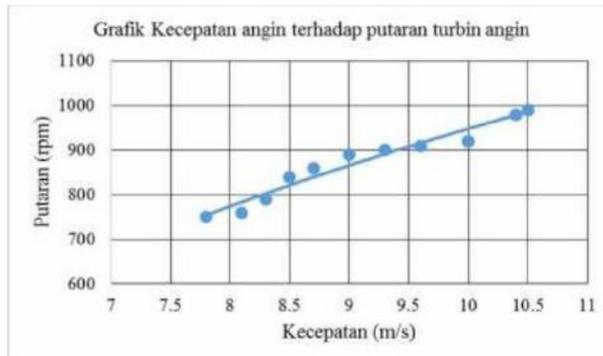
Gambar 2.13 menunjukkan *layout* turbin angin Darrieus-Savonius di mana dibuat dengan menggabungkan turbin angin Darrieus dan turbin angin Savonius pada satu poros yang sama, dengan turbin angin Savonius berada di dalam turbin angin

Darrieus. Kelebihan bentuk seperti ini adalah kemampuan mengekstrak daya yang relatif konsisten pada berbagai macam kondisi angin. Turbin angin Darrieus-Savonius ini memiliki tinggi 2,16 meter dan diameter 2,34 m. Turbin angin Darrieus memiliki 3 buah sudu berbentuk *airfoil* simetri dengan panjang *chord* 10 cm. Turbin angin Savonius memiliki konfigurasi 2 tingkat dan 2 sudu berbentuk setengah lingkaran. *Tower* memiliki ketinggian 4 m dari permukaan tanah dan diameter 14 cm dengan ketebalan 0,8 cm.



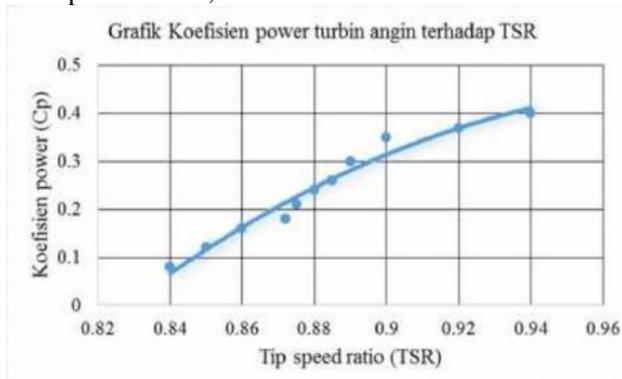
Gambar 2.13. *Layout* turbin angin Darrieus-Savonius (Dwiyantoro et al, 2015)

Gambar 2.14 menunjukkan hubungan antara kecepatan angin yang mengenai sudu turbin angin dengan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin. Data dihasilkan pada saat turbin angin mulai menghasilkan daya, yaitu pada kecepatan angin di *wind tunnel* 7,5 m/s dengan putaran turbin 742 rpm. Grafik menunjukkan semakin besar kecepatan angin yang mengenai sudu turbin angin maka putaran yang dihasilkan semakin besar pula. Hal ini disebabkan energi yang dimiliki angin berbanding lurus dengan kecepatan angin yang terjadi, sehingga putaran yang terjadi semakin tinggi.



Gambar 2.14. Grafik kecepatan angin terhadap putaran turbin angin (Dwiyantoro et al, 2015)

Gambar 2.15 menunjukkan koefisien daya turbin angin meningkat seiring dengan meningkatnya TSR. Hal ini disebabkan karena TSR dipengaruhi oleh kecepatan angin yang mengenai sudu turbin angin, di mana semakin besar kecepatan angin maka TSR semakin besar pula. Turbin angin memiliki koefisien daya maksimum pada TSR 0,95 sebesar 42%.



Gambar 2.15. Grafik koefisien daya turbin angin terhadap TSR (Dwiyantoro et al, 2015)

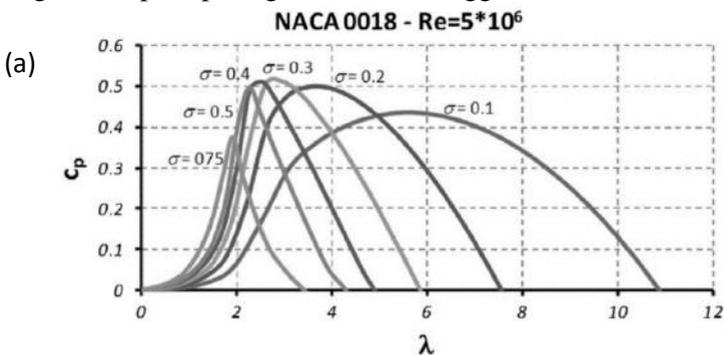
Hasil eksperimen untuk mengetahui karakteristik turbin angin Darrieus-Savonius menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan angin, maka energi yang dihasilkan semakin besar, oleh sebab itu koefisien daya dari turbin angin Darrieus-Savonius

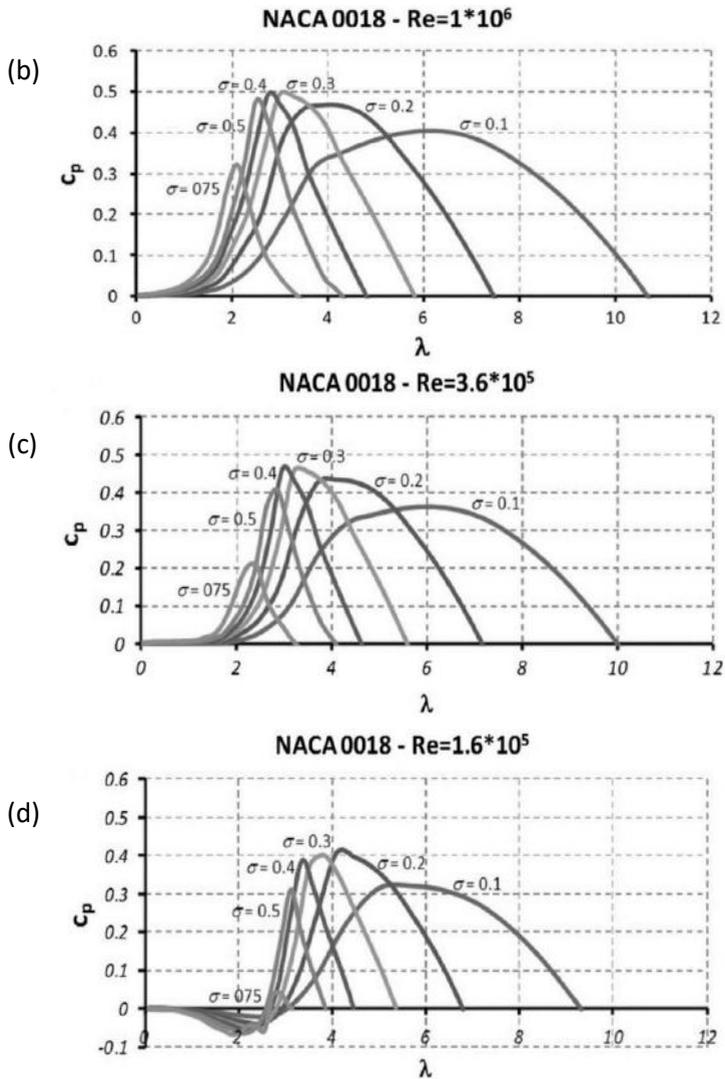
semakin meningkat. Desain turbin angin ini mampu menghasilkan daya 500 Watt pada kecepatan angin 7,5 m/s.

2.1.4. Brusca et al. (2014)

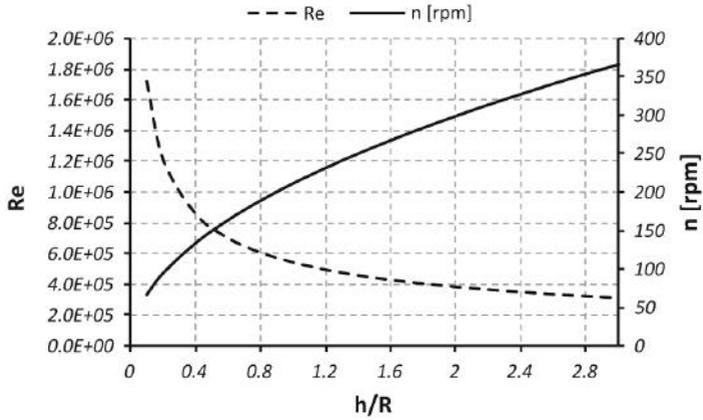
Penelitian yang dilakukan Brusca et al. (2014) adalah untuk menganalisa hubungan antara *aspect ratio* pada turbin angin sumbu vertikal H-rotor dengan performanya (koefisien daya). *Aspect ratio* pada turbin angin ini didefinisikan sebagai perbandingan antara tinggi sudu dan jari-jari turbin. Dikarenakan variasi *aspect ratio* pada turbin angin sumbu vertikal menyebabkan variasi nilai Reynolds number, maka setiap perubahan pada koefisien daya pun bisa di analisa untuk mengetahui pengaruh *aspect ratio* terhadap performa turbin.

Dengan menggunakan kalkulasi berdasarkan *Multiple Stream Tube Model* (MSTM), performa turbin angin sumbu vertikal dievaluasi dengan *aspect ratio* yang bervariasi. Pada penelitian ini model sudu yang digunakan adalah airfoil NACA 0018. Dengan menggunakan beberapa formulasi matematika, didapatkan nilai koefisien daya dengan variasi nilai Reynolds number (Re) yang disajikan pada gambar 2.16.a – d. Selain itu, didapatkan juga hubungan *aspect ratio* dengan koefisien daya (C_p), Reynolds number (Re) dan kecepatan putar (rpm) turbin angin ini seperti pada gambar 2.17. hingga 2.19.

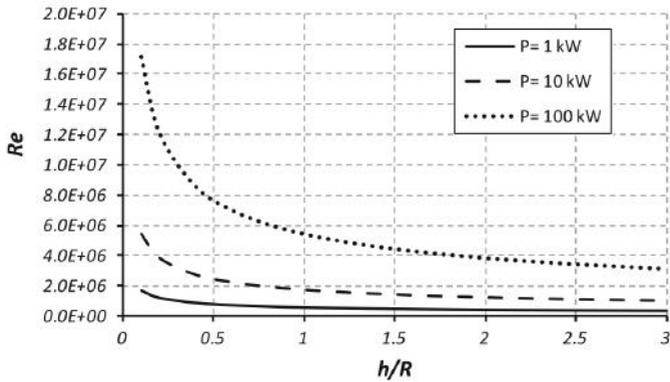




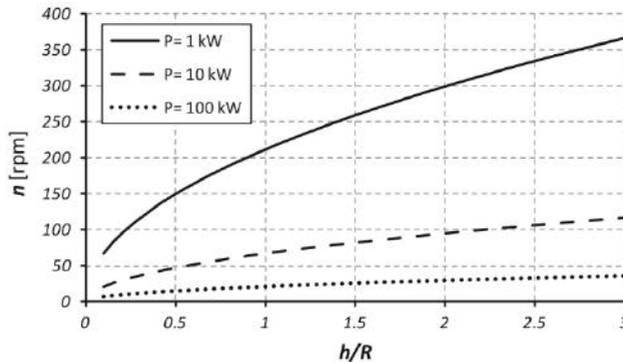
Gambar 2.16.a – d. Grafik koefisien daya vs *angle of attack* pada Re yang bervariasi



Gambar 2.17. Efek *aspect ratio* (h/R) pada turbin angin sumbu vertikal



Gambar 2.18. Efek *aspect ratio* pada Reynolds number (Re) dengan variasi power yang diberikan



Gambar 2.19. Efek *aspect ratio* pada kecepatan putar (n) dengan variasi power yang diberikan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini yaitu, koefisien daya turbin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai Reynolds number. *aspect ratio* (h/R) ini mempengaruhi nilai Reynolds number dan juga koefisien daya. Turbin angin dengan *aspect ratio* yang rendah memiliki beberapa keuntungan, yaitu memiliki koefisien daya yang lebih tinggi, dapat menggunakan sudu yang lebih tebal dan memiliki momen inersia yang lebih baik.

2.2. DASAR TEORI

2.2.1. Energi Angin

Energi angin merupakan energi alternatif yang mempunyai prospek bagus ke depannya karena merupakan sumber energi yang bersih dan terbarukan. Pada dasarnya energi angin terjadi karena ada perbedaan suhu antara angin panas dan angin dingin. Di daerah khatulistiwa, anginnya menjadi panas, mengembang dan menjadi ringan, lalu naik ke atas dan bergerak ke daerah yang lebih dingin. Sebaliknya daerah kutub yang dingin, anginnya menjadi dingin dan turun ke bawah. Dengan demikian terjadi suatu perputaran angin berupa perpindahan angin dari kutub utara ke garis khatulistiwa menyusuri permukaan bumi dan sebaliknya suatu perpindahan angin dari garis khatulistiwa kembali ke kutub utara melalui lapisan angin yang lebih tinggi.

2.2.2. Potensi Tenaga Angin

Proses pemanfaatan energi angin dilakukan melalui dua tahapan konversi energi, pertama aliran angin akan menggerakkan rotor (baling-baling) yang menyebabkan rotor berputar selaras dengan angin yang bertiup, kemudian putaran dari rotor dihubungkan dengan generator, dari generator inilah dihasilkan arus listrik. Jadi proses tahapan konversi energi bermula dari energi kinetik angin menjadi energi gerak rotor kemudian menjadi energi listrik. Besarnya energi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya adalah sebagai berikut :

1. Rotor (baling-baling), rotor turbin sangat bervariasi jenisnya, diameter rotor akan berbanding lurus dengan daya listrik. Semakin besar diameter semakin besar pula listrik yang dihasilkan, dilihat dari jumlah sudu rotor (baling-baling), sudu dengan jumlah sedikit berkisar antara 2-6 buah lebih banyak digunakan.
2. Kecepatan angin, kecepatan angin akan mempengaruhi kecepatan putaran rotor yang akan menggerakkan generator.
3. Jenis generator, generator terbagi dalam beberapa karakteristik yang berbeda, generator yang cocok untuk Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) adalah generator yang dapat menghasilkan arus listrik pada putaran rendah.

Listrik yang dihasilkan dari Sistem Konversi Energi Angin akan bekerja optimal pada siang hari di mana angin berhembus cukup kencang dibandingkan dengan malam hari, sedangkan penggunaan listrik biasanya akan meningkat pada malam hari. Untuk mengantisipasi, sistem ini sebaiknya tidak langsung digunakan untuk keperluan produk-produk elektronik, namun terlebih dahulu disimpan dalam satu media seperti baterai atau aki sehingga listrik yang keluar besarnya stabil dan bisa digunakan kapan saja. Syarat dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan kincir angin dan jari-jari 1 meter dapat dilihat seperti pada tabel 2.3 dibawah ini.

Tabel 2.3. Tingkatan kecepatan angin 10 meter di atas permukaan tanah

| Tingkat Kecepatan Angin 10 meter di atas permukaan Tanah | | |
|--|-------------|---|
| Kelas | Kecepatan | Kondisi Alam di Daratan |
| 1 | 0,00 – 0,02 | ----- |
| 2 | 0,3 – 1,5 | Angin tenang, asap lurus ke atas |
| 3 | 1,6 – 3,3 | Asap bergerak mengikuti arah angin |
| 4 | 3,4 – 5,4 | Wajah terasa ada angin, daun2 bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak |
| 5 | 5,5 – 7,9 | Debu jalan, kertas beterbangan, ranting pohon bergoyang |
| 6 | 8,0 – 10,7 | Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar |
| 7 | 10,8 – 13,8 | Ranting pohon besar bergoyang, air plampung berombak kecil |
| 8 | 13,9 – 17,1 | Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga |
| 9 | 17,2 – 20,7 | Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin |
| 10 | 20,8 – 24,4 | Dapat mematahkan ranting pohon, rumah rubuh |
| 11 | 24,5 – 28,4 | Dapat merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan |
| 12 | 28,5 – 32,6 | Menimbulkan kerusakan parah |
| 13 | 32,7 – 36,9 | Tornado |

Klasifikasi angin pada kelompok 3 adalah batas minimum dan angin pada kelompok 8 adalah batas maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

Perhitungan Potensi Energi Angin secara matematis berdasarkan rumus sebagai berikut :

$$P = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho \times A \times v^3$$

dengan :

P = potensi energi angin (watt day/year)

C_p = koefisien daya

ρ = kerapatan angin rata-rata (kg/m³)

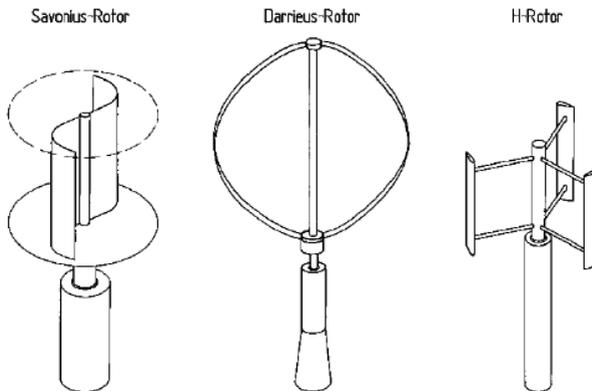
A = luas sapuan rotor (m²)

v = kecepatan angin rata-rata harian (m/s)

2.2.3. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal (*vertical axis wind turbine / VAWT*) adalah jenis turbin angin yang pertama kali dibuat oleh manusia. Pada awalnya putaran rotornya hanya memanfaatkan efek Magnus yaitu efek yang terjadi karena adanya selisih gaya *drag* pada kedua sisi rotor sehingga menghasilkan momen gaya terhadap sumbu putar rotor. Satu di antara contoh turbin angin sumbu vertikal jenis *drag* adalah turbin angin Savonius, terdiri dari dua atau tiga lembar pelat yang dilengkungkan pada arah tangensial yang sama terhadap sumbu putar. Jenis turbin angin VAWT mempunyai poros yang tegak lurus dengan tanah.

Turbin angin sumbu vertikal modern menerapkan bentuk yang aerodinamis pada rotornya untuk menghasilkan momen gaya. Contohnya adalah turbin angin Darrieus. Pada turbin angin Darrieus, sudu dibentuk melengkung dan berputar menyapu ruangan seperti tali yang berputar pada sumbu vertikal. Hal ini menyebabkan bentuk geometri sudunya rumit dan sulit untuk dibuat. Rotor turbin angin Darrieus pada umumnya terdiri atas dua atau tiga sudu. Variasi dari turbin angin Darrieus adalah yang disebut dengan Turbin angin H-rotor. Tersusun dari dua atau tiga sudu lurus yang dihubungkan dengan struktur rangka ke poros. Berbagai macam jenis turbin angin sumbu vertikal dapat dilihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.20. Varian turbin angin sumbu vertikal

Keuntungan menggunakan turbin angin jenis VAWT antara lain :

1. Dapat mengkonversi energi angin dari segala arah
2. Dapat mengkonversi energi angin yang tidak stabil kecepatannya
3. Saat beroperasi tidak bising
4. Desainnya sederhana dan ringan.

Sedangkan kelemahan menggunakan turbin angin jenis VAWT yaitu :

1. Kecepatan angin sangat rendah ketika di dekat permukaan tanah, sehingga kecepatan angin akan sangat rendah pada bagian bawah rotor.
2. Mesin turbin tidak dapat melakukan *self-starting*, misalnya mesin Darrieus membutuhkan *push* sebelum dimulai.
3. Mesin turbin mungkin perlu kabel penahan untuk menahan sistem, tapi kabel penahan tidak praktis di daerah pertanian.

Namun demikian, untuk mengatasi kelemahan diatas, sampai sekarang ini masih banyak dilakukan penelitian-penelitian yang menghasilkan penemuan baru. Sebab bagaimanapun juga khususnya turbin angin kecil masih banyak berfungsi atau digunakan, diantaranya untuk :

- Pengisian baterai untuk perangkat energi yang rendah seperti pencahayaan, radio, wifi, televisi, dan lain-lain.
- Memasok daya ke lokasi terpencil seperti perahu, kapal pesiar, sekedar keluar rumah, dan lokakarya.
- Mempertahankan listrik untuk pagar hewan, budidaya ikan, irigasi, stasiun meteorologi, unit *repeater* radio, dan lain-lain.

2.2.4. Turbin Angin Darrieus

Turbin angin ini merupakan jenis VAWT dengan efisiensi tinggi dan mampu menghasilkan torsi cukup besar pada putaran dan kecepatan angin yang tinggi. Turbin angin Darrieus mengaplikasikan sudu dengan bentuk dasar airfoil simetris (seperti NACA seri 4-digit 0012, 0015, 0018, dll). Mengacu pada bentuk

sudu, prinsip kerja turbin angin Darrieus memanfaatkan gaya *lift* yang terjadi ketika permukaan airfoil dikenai aliran angin. Kelemahan utama dari turbin angin Darrieus yakni mempunyai torsi awal berputar yang kecil sehingga tidak bisa melakukan *self starting*. Pada aplikasinya, turbin angin Darrieus selalu membutuhkan perangkat bantuan untuk melakukan putaran awal. Perangkat bantuan yang digunakan berupa motor listrik atau umumnya lebih sering menggunakan gabungan turbin angin Savonius pada poros utama. Turbin angin Darrieus umumnya menggunakan tiga sudu untuk menghindari fluktuasi torsi yang besar.

Turbin angin modern yang banyak dipakai saat ini ditemukan oleh *engineer* Prancis, George Jean Marie Darrieus, yang dipatenkannya pada tahun 1931 di Amerika Serikat. Desain yang dibuatnya adalah tipe *Eggbeater* (atau *Curved Bladed*) dan *Straight-bladed* (atau *giromill* atau *cyclo-turbine*) VAWTs. Sketsa kedua jenis variasi konsep Darrieus masing-masing ditunjukkan pada Gambar 2.17 dan 2.18 Turbin angin tipe *Eggbeater*, yang meminimalkan tegangan lentur pada sudunya, di masa lalu banyak digunakan di California secara komersial.

H-rotor adalah pengembangan dari turbin angin Darrieus tipe *Straight-bladed* dengan menggunakan dua *blade* saja. Tipe ini dikembangkan di Inggris melalui penelitian pada tahun 1970-1980 dengan tujuan untuk menyederhanakan bentuk turbin angin Darrieus tipe *Straight-blade*. Sketsa turbin angin jenis H-rotor ini ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.21. Turbin Angin Darrieus VAWT Tipe *Eggbeater* (atau *Curved Bladed*)



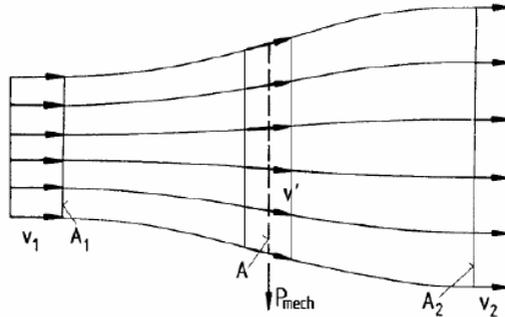
Gambar 2.22. Turbin Angin Darrieus VAWT Tipe *Straight-bladed*



Gambar 2.23. Turbin Angin Darrieus VAWT Tipe H-Rotor

2.2.5. Teori Betz

Teori Betz berdasarkan pada pemodelan aliran angin dua dimensi yang mengenai rotor yang menjelaskan prinsip konversi energi angin pada turbin angin. Kecepatan aliran angin berkurang dan garis aliran membelok ketika melalui rotor yang dipandang pada satu bidang. Berkurangnya kecepatan aliran angin disebabkan oleh sebagian energi kinetik angin yang diserap oleh rotor turbin angin. Pada kenyataannya, putaran rotor menghasilkan perubahan kecepatan angin pada arah tangensial yang akibatnya mengurangi jumlah total energi yang dapat diambil dari angin. Walaupun teori Betz telah mengalami penyederhanaan, namun teori ini cukup baik untuk menjelaskan bagaimana energi angin dapat dikonversi menjadi bentuk energi lainnya.



Gambar 2.24. Kondisi aliran angin akibat ekstraksi energi mekanik aliran bebas

Pertama dengan menganggap bahwa kecepatan angin yang melalui penampang A adalah sebesar v , maka aliran volume angin yang melalui penampang rotor pada setiap satuan waktu adalah,

$$V = vA$$

di mana :

V = laju volume angin (m^3/s)

v = kecepatan angin (m/s)

A = luas area sapuan rotor (m^2)

dengan demikian, laju aliran massa dapat dirumuskan dengan persamaan,

$$\dot{m} = \rho vA = \text{constant}$$

di mana :

ρ = massa jenis angin (kg/m^3)

Hal ini menyatakan bahwa laju aliran massa selalu konstan sepanjang aliran. Lalu dilanjutkan dengan persamaan gaya pada rotor yang dikenai angin,

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

di mana :

v_1 = kecepatan angin di daerah *upstream*

v_2 = kecepatan angin di daerah *downstream*

Energi atau kerja yang disebabkan oleh angin dapat dituliskan,

$$dE = F dx$$

Kemudian didapatkan persamaan daya akibat aliran angin yang terjadi,

$$P = \frac{dE}{dt} = F \frac{dx}{dt} = Fv$$

Lalu substitusi gaya (F) dengan persamaan sebelumnya, didapatkan,

$$P = \rho Av^2(v_1 - v_2)$$

Persamaan yang menyatakan daya akibat perubahan energi kinetik adalah,

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2}{\Delta t} = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2)$$

Menggunakan persamaan kontinuitas, daya (P) dapat dituliskan kembali menjadi,

$$P = \frac{1}{2}\rho Av(v_1^2 - v_2^2)$$

Menggabungkan persamaan ini dengan persamaan daya sebelumnya, didapatkan,

$$\rho Av^2(v_1 - v_2) = \frac{1}{2}\rho Av(v_1^2 - v_2^2)$$

Kemudian disederhanakan menjadi,

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

Persamaan ini menyatakan bahwa kecepatan angin pada rotor dapat diasumsikan sebagai kecepatan rata-rata dari kecepatan angin di daerah *upstream* (v_1) dan kecepatan angin di daerah *downstream* (v_2). Persamaan gaya (F) dan daya (P) selanjutnya, dengan memasukkan persamaan nilai kecepatan angin yang baru (v), akan menjadi,

$$F = \rho Av(v_1 - v_2) = \frac{1}{2}\rho A(v_1^2 - v_2^2)$$

$$\begin{aligned} P &= \rho Av^2(v_1 - v_2) = \frac{1}{4}\rho A(v_1 + v_2)^2(v_1 - v_2) \\ &= \frac{1}{4}\rho A(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \end{aligned}$$

Lalu didapatkan *downstream velocity factor* (b), yaitu rasio antara kecepatan *downstream* dan *upstream*, sebagai berikut,

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

Dengan memasukkan persamaan *downstream velocity factor* (b), maka persamaan gaya (F) dan daya (P) berubah menjadi,

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

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

Persamaan daya yang tidak terpengaruh oleh aliran *upstream*, dengan $v = v_1$ dan melewati luas penampang A , dapat dituliskan,

$$W = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

Koefisien daya adalah persamaan tak berdimensi yang menyatakan rasio antara daya yang dapat digunakan terhadap daya yang melewati penampang rotor,

$$C_p = \frac{P}{W}$$

Koefisien daya juga menyatakan efisiensi yang dapat dicapai oleh suatu turbin angin, dengan memasukkan persamaan daya (P) dan energi kinetik (W), maka akan diperoleh,

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

Apabila dimasukkan nilai $b = 1$, $v_1 = v_2$, dan aliran angin diabaikan, maka koefisien daya bernilai nol. Namun apabila $b = 0$, $v_1 = 0$, maka koefisien daya bernilai 0,5. Koefisien daya maksimal bisa dicapai dengan menggunakan konsep diferensial agar didapat nilai *downstream velocity factor* (b) yang optimal pula, persamaannya menjadi,

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

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

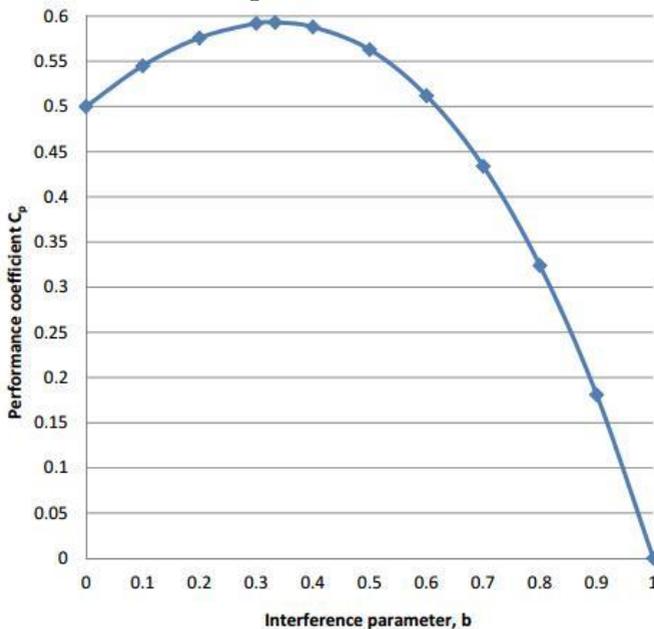
$$0 = \frac{1}{2}(1 - b^2 - 2b - 2b^2)$$

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

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

Dari persamaan ini didapatkan,

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



Gambar 2.25. Grafik koefisien daya terhadap rasio kecepatan aliran angin

Persamaan ini menunjukkan bahwa untuk mencapai operasi yang optimal, maka *downstream velocity factor* (b) harus bernilai $1/3$ atau v_2 bernilai sepertiga dari v_1 . Memakai persamaan ini, didapat koefisien daya sebagai berikut:

$$C_p = \frac{1}{2}(1 - b^2)(1 + b) = \frac{1}{2}\left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right)\left(1 + \frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27}$$

$$= 0,59259 = 59,26\%$$

Nilai koefisien daya yang didapatkan ini disebut sebagai Betz *Limit*. Nilai ini adalah daya teoritis maksimum yang dapat dimanfaatkan yang diperoleh dari aliran angin ideal.

2.2.6. Koefisien Daya & Torsi

Koefisien daya adalah hal penting dalam merancang turbin angin karena menunjukkan berapa besar energi angin yang dapat diekstraksi dari energi kinetik angin yang melalui penampang rotor menjadi suatu daya. Koefisien daya sangat mempengaruhi kinerja turbin angin, dan dipengaruhi oleh konstruksi turbin angin dan prinsip konversi energinya. Nilai koefisien daya maksimum secara teoritis adalah 59,26% atau sama dengan Betz *Limit*.

Koefisien torsi didefinisikan sebagai rasio antara nilai torsi yang dihasilkan oleh rotor dan torsi teoritis angin,

$$C_q = \frac{\text{torsi rotor}}{\text{torsi angin}} = \frac{T}{T_w} = \frac{I\alpha}{\frac{1}{4}\rho Adv^2}$$

di mana,

I = momen inersia rotor (kg.m² atau N.m.s²)

α = percepatan sudut rotor (rad/s²)

ρ = massa jenis (kg/m³)

A = luas penampang rotor (m²)

d = diameter satu sudu (m)

v = kecepatan angin (m/s)

Salah satu aplikasi dari nilai koefisien torsi adalah ketika akan melakukan pengujian pada rotor yang telah terhubung oleh *gearbox* dan generator. Koefisien lain yang dapat mengukur performa turbin angin adalah koefisien torsi statis. Koefisien ini didefinisikan sebagai torsi yang mengukur kemampuan *self starting* turbin angin dan didapatkan ketika rotor berada pada posisi diam.

$$C_{qs} = \frac{\text{torsi statis rotor}}{\text{torsi angin}} = \frac{T_s}{T_w} = \frac{I\alpha}{\frac{1}{4}\rho A d v^2}$$

2.2.7. Tip Speed Ratio

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin. TSR juga dapat dilambangkan dengan λ . Secara perumusan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$TSR = \frac{u}{v} = \frac{\omega r}{v}$$

di mana :

TSR = *tip speed ratio*

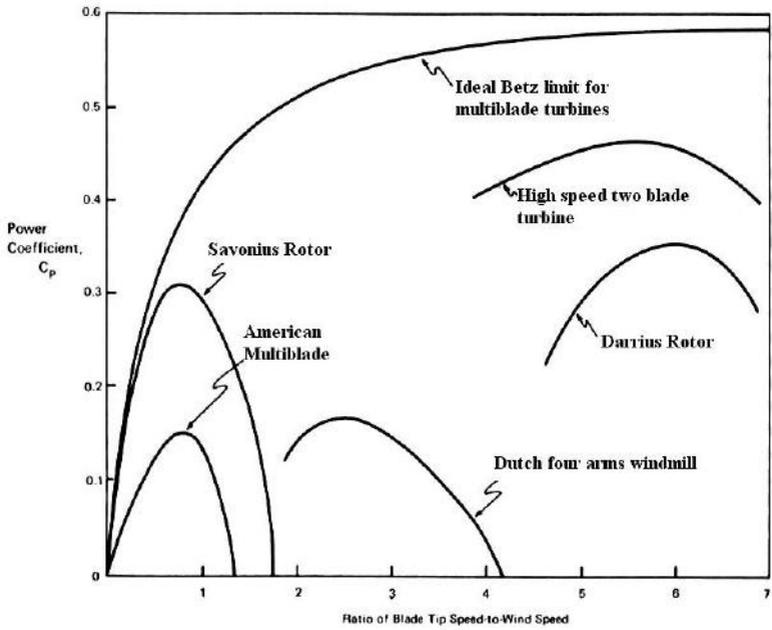
u = kecepatan turbin (m/s)

ω = putaran turbin (rpm)

r = jari-jari rotor

v = kecepatan angin (m/s)

Karena setiap turbin memiliki karakteristik yang berbeda-beda, maka koefisien daya pun juga dipengaruhi oleh *tip speed ratio*. Apabila turbin angin memiliki grafik yang hampir mendekati Betz *Limit*, maka koefisien daya yang dimiliki akan semakin tinggi begitu pula dengan efisiensi. Grafik koefisien daya terhadap TSR ditunjukkan pada gambar 2.22. Semakin luas daerah di bawah grafik pada gambar 2.22 menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan angin, maka semakin besar pengaruhnya terhadap sudu turbin. Jadi turbin tersebut mampu memanfaatkan kecepatan angin yang tinggi untuk dikonversi menjadi kecepatan turbin yang juga semakin tinggi. Titik mulai grafik menunjukkan bahwa turbin angin mulai bekerja pada nilai TSR tertentu. Jika titik mulai berada pada TSR rendah maka turbin tersebut mampu bekerja pada kecepatan angin rendah. Selain itu secara umum pada grafik tiap turbin juga ditunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya TSR hal ini tidak serta merta akan meningkatkan koefisien daya (C_p). Pada saat tertentu saja koefisien daya (C_p) akan berada pada posisi maksimum. Berikut adalah grafik perbandingan TSR dengan koefisien daya (C_p) pada beberapa jenis turbin angin.



Gambar 2.26. Grafik koefisien daya terhadap *tip speed ratio*

BAB III METODE PENELITIAN

1.1. VARIASI DAN DOMAIN SIMULASI

1.1.1. Variasi

Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik menggunakan metode *software* STAR-CCM+ 9.02.007-R8. Penelitian dengan metode numerik ini secara umum memiliki tiga tahapan utama yang perlu dilakukan yaitu *Pre-processing*, *processing* dan *post-processing*.

Model yang dibuat berupa geometri 2D dari turbin angin Darrieus dengan sumbu vertikal dengan variasi jumlah sudu dan kecepatan angin *freestream*. Variasi penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Variasi jumlah sudu dan kecepatan angin yang digunakan

| Parameter | Nilai |
|-----------------|----------------------------|
| Jumlah Sudu | 3 sudu & 4 sudu |
| Kecepatan Angin | 5, 7, 9, 11, 13 & 15 (m/s) |

1.1.2. Domain Simulasi

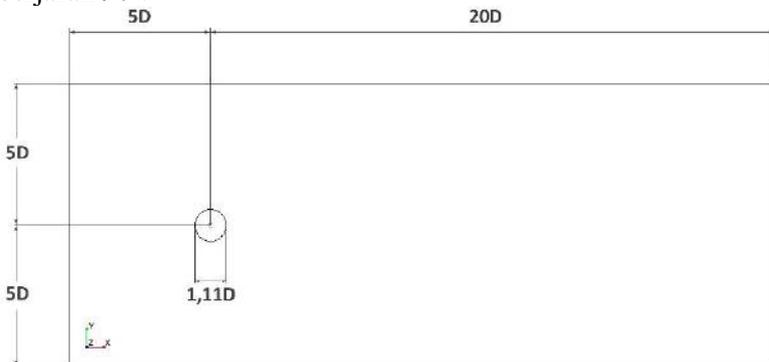
Domain simulasi yang digunakan pada penelitian kali ini terdiri dari *static domain* dan *rotating domain*. *Static domain* adalah *domain* terluar yang berbentuk persegi panjang yang hanya dilintasi fluida dan *domain* ini tidak bergerak. *Rotating domain* ditunjukkan dengan bentuk lingkaran yang menyelimuti sudu-sudu dan poros turbin angin Darrieus. *Rotating domain* ini diperlakukan sebagai *rotation motion* yang berputar dengan *time step* tertentu.

3.2. TAHAP PRE-PROCESSING

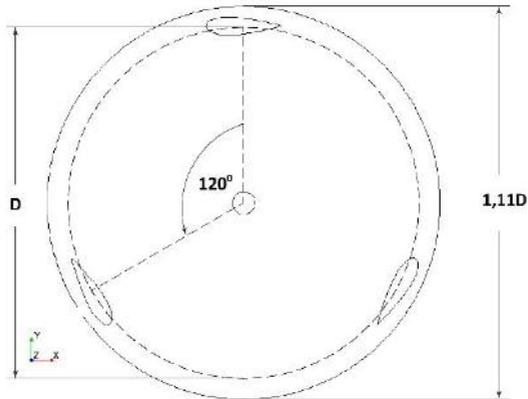
3.2.1. Pembuatan Geometri, Grid Independency Test & Meshing

Pembuatan geometri merupakan proses menggambar bentuk model berupa sudu, poros serta *domain* yang digunakan pada penelitian turbin angin Darrieus sumbu vertikal ini. Setelah

selesai dalam membuat model tersebut, maka hal yang dilakukan selanjutnya adalah melakukan penamaan tiap bagian *face* model tersebut. Diameter rotor ($D = 234$ mm) menjadi acuan dalam pembuatan geometri ini dengan diameter poros 15 mm dan panjang *chord* setiap sudu 50 mm. Nilai diameter rotor ini diadaptasi dari diameter rotor pada penelitian Dwiyantoro et al (2015) dengan skala 1:10. Nilai *solidity* yang didapat dari rumus $\sigma = \frac{Nc}{2R}$ (N = jumlah sudu turbin, c = panjang *chord* sudu, dan R = jari-jari turbin) pada model turbin angin ini adalah 0,641 untuk turbin angin Darrieus tiga sudu dan 0,855 untuk turbin angin Darrieus empat sudu. Pada simulasi ini potongan penampang yang digunakan adalah bagian tengah dari turbin angin, yaitu bagian dengan jarak sudu dan poros terjauh, dikarenakan pada bagian ini memiliki nilai *solidity* (σ) yang lebih rendah daripada bagian lainnya. Jika nilai *solidity* meningkat, maka efisiensi turbin menurun. Oleh karena itu, daerah dengan jarak sudu dan poros terjauh memiliki efisiensi yang lebih baik dari daerah lainnya. Geometri *static domain* dan *rotating domain* turbin angin Darrieus tiga sudu dapat dilihat pada gambar 3.1 dan 3.2, sedangkan geometri *static domain* dan *rotating domain* turbin angin Darrieus empat sudu memiliki spesifikasi yang sama dengan turbin angin Darrieus tiga sudu akan tetapi antar sudunya berjarak 90° .



Gambar 3.1. Spesifikasi geometri *static domain* turbin angin Darrieus tiga sudu



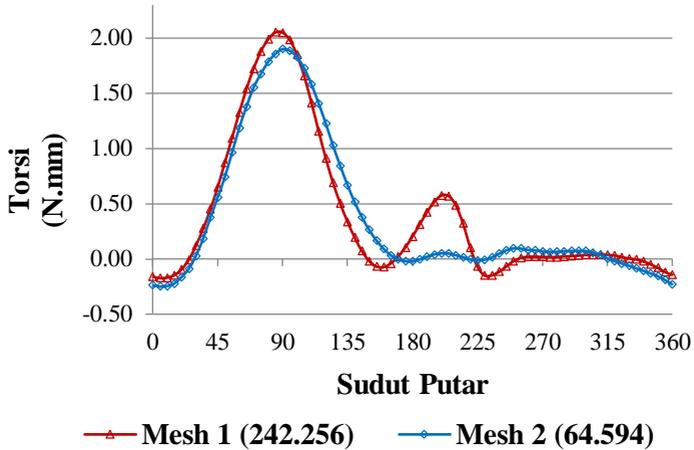
Gambar 3.2. Spesifikasi geometri *rotating domain* turbin angin Darrieus tiga sudu

Grid independency test adalah proses yang perlu dilakukan sebelum melakukan *meshing*. Proses ini menentukan seberapa banyak jumlah *cell* yang akan digunakan pada *mesing* simulasi numerik ini agar mampu menghasilkan nilai yang optimal. *Grid independency test* ini dilakukan pada turbin angin Darrieus tiga sudu dengan kecepatan *freestream* 15 m/s menggunakan *mesh* dengan jumlah total *cell* masing-masing 242.256 *cell* dan 64.594 *cell*. Kedua *mesh* ini dikomparasi satu sama lain melalui torsi yang dihasilkannya seperti tampak pada gambar 3.3.

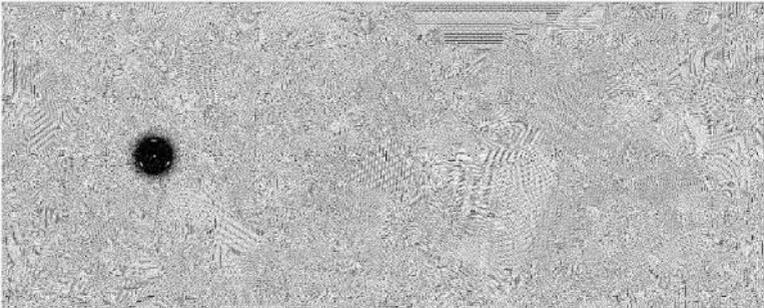
Pada Gambar tersebut terlihat bahwa *mesh* 1 lebih mampu menangkap fenomena-fenomena yang terjadi pada daerah *downstream*, misalnya saja adanya *vortex* yang terjadi dan terjadinya *peak* kedua. Profil grafik torsi *mesh* 1 ini sesuai dan lebih mendekati *grid independency test* yang dilakukan Gorle et al (2016). Oleh karena itu dipilihlah *mesh* 1 dengan jumlah total *cell* 242.256 sebagai *meshing* digunakan pada simulasi numerik ini.

Pembuatan *meshing* yaitu membagi geometri yang telah dibuat menjadi elemen-elemen kecil sehingga *boundary condition* dan beberapa parameter yang ditentukan dapat diaplikasikan ke dalam setiap elemen kecil tersebut. Bentuk *mesh* yang digunakan adalah *tetrahedral mesh* dengan metode *automated mesh*.

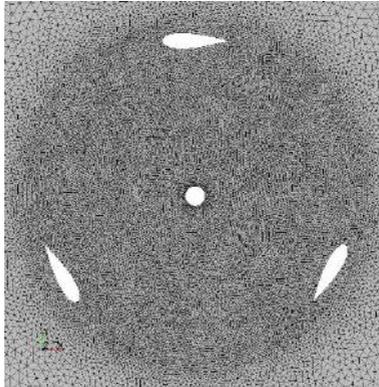
Tampilan *mesh* yang diterapkan pada model turbin angin Darrieus tiga sudu dapat dilihat pada gambar 3.4 dan 3.5. Turbin angin Darrieus empat sudu memiliki tampilan *mesh* yang sama seperti pada gambar tersebut, hanya saja turbin angin Darrieus empat sudu memiliki tambahan satu sudu pada daerah *rotating domain*.



Gambar 3.3. Torsi yang dihasilkan oleh 2 *mesh* dengan jumlah *cell* yang berbeda



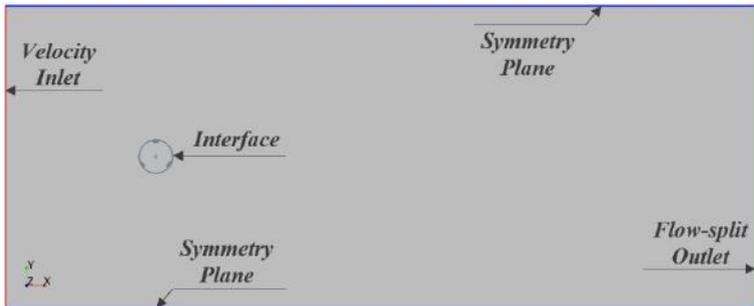
Gambar 3.4. *Meshing* turbin angin Darrieus tiga sudu



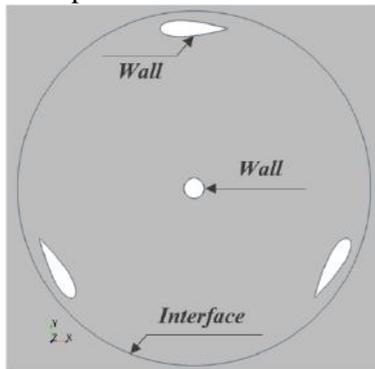
Gambar 3.5. Perbesaran gambar *meshing* turbin angin Darrieus tiga sudu di daerah *rotating domain*

3.2.2. *Boundary Conditions*

Boundary Condition adalah kondisi-kondisi batas yang ditetapkan pada geometri yang telah dibuat, yakni pada sudu, poros, titik temu antara dua *domain*, dan batas aliran eksternal, agar sesuai dengan kondisi aliran yang melewati benda uji tersebut. *Boundary condition* yang ditetapkan pada *inlet* yaitu *velocity inlet* dengan variasi nilai kecepatan 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s, sedangkan pada *outlet* digunakan *flow-split outlet*. Pada titik temu antara dua *domain* ditetapkan sebagai *interface*. *Interface* adalah *boundary condition* berupa *wall* yang diatur supaya dapat ditembus oleh aliran fluida, seolah-olah tidak ada pembatas antara kedua *domain* yang bersinggungan. Terakhir pada sudu dan poros ditetapkan sebagai *wall* dengan kondisi *rotation motion*. *Boundary conditions* ini ditunjukkan pada gambar 3.5 dan 3.6. Kesemua *boundary conditions* ini diterapkan pada turbin angin Darrieus tiga sudu maupun empat sudu, meskipun pada gambar berikut hanya ditampilkan pada turbin angin Darrieus tiga sudu saja.



Gambar 3.6. *Boundary conditions* pada turbin angin Darrieus tiga sudu pada daerah *static domain*



Gambar 3.7. *Boundary conditions* pada turbin angin Darrieus tiga sudu pada daerah *rotating domain*

3.2.3. Parameter Pemodelan

3.2.3.1. Models

Pemodelan aliran yang digunakan adalah *segregated flow*, *k-epsilon turbulence* dan *realizable k-epsilon*. Model ini dipilih karena memiliki cakupan aplikasi yang luas dan telah umum digunakan. Model *k-epsilon* ini juga sangat baik untuk mendapatkan data-data yang berkaitan dengan performa simulasi turbin angin yang berputar, misalnya saja torsi dan koefisien daya, dengan waktu simulasi yang relatif lebih cepat. Pemodelan lainnya yang dipilih adalah *implicit unsteady* dengan diskretisasi *second-*

order upwind mengingat bahwa sudu dan poros turbin angin diperlakukan sebagai *rotation motion*.

3.2.3.2. *Materials*

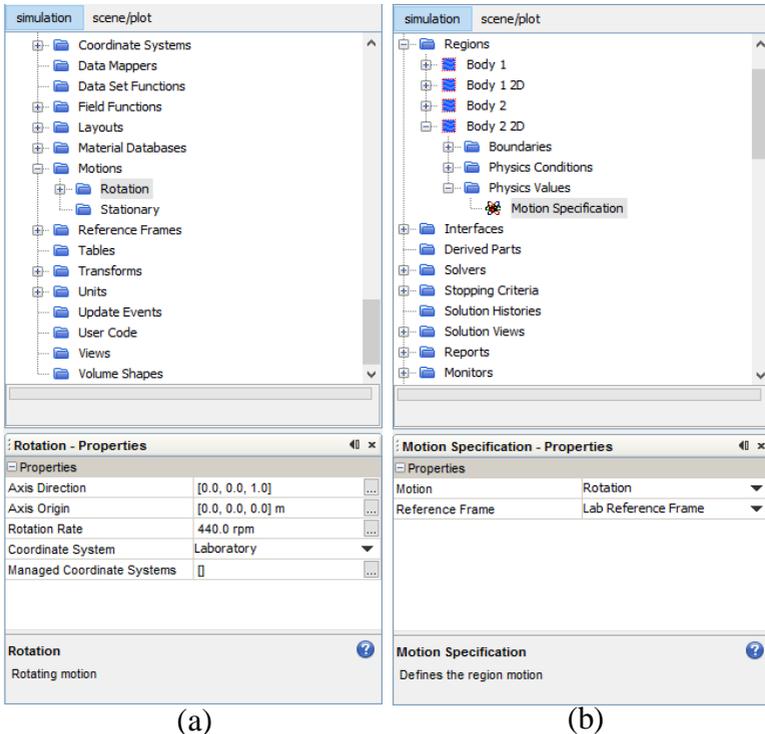
Penelitian ini menggunakan udara sebagai fluida kerja dengan *density* 1,18415 kg/m³ (*constant*) dan *dynamic viscosity* 1,85508E-5 Pa.s (*constant*). Nilai *Reynolds Number* (Re) yang dihitung menggunakan rumus $R = \frac{Vc}{\nu}$ (V = Kecepatan *freestream*; c = panjang *chord* sudu; ν = *kinematic viscosity* angin) pada kecepatan 5, 7, 9, 11, 13 dan 15 m/s berturut-turut adalah 15.958, 22.341, 28.725, 35.108, 41.491 dan 47.875.

3.2.3.3. *Rotation Motion*

Turbin angin pada penelitian ini diputar dengan mengaktifkan fitur *rotation* pada bagian *Tools -> Motions -> Rotation*. Pada bagian *Rotation* ini, *axis directions* diberi nilai 1 pada sumbu z (karena turbin angin berputar terhadap sumbu z), *axis origin* diberi nilai 0 (karena berputar pada titik pusat koordinat xyz) dan *rotation rate* diberi nilai sesuai dengan kisaran putaran turbin angin Darrieus ini. Setelah semua nilai ditetapkan, dipilih opsi *Rotation* pada kolom *Motion*. pada *subnode Physics Values -> Motion Specification* di *body 2D* yang akan diputar (dalam hal ini *rotating domain*). Pengaturan *rotation motion* ini dapat dilihat pada gambar 3.7 (a) dan (b).

3.3. TAHAP PROCESSING

Pada tahap *processing*, parameter-parameter yang telah ditetapkan pada saat *pre-processing* akan diiterasi hingga mencapai kriteria konvergensi yang diinginkan, yakni ketika nilai residual mencapai 10⁻⁵, kecuali *continuity* yang dianggap konvergen ketika residual mencapai 10⁻³. Jika kriteria konvergensi tercapai, maka langkah selanjutnya adalah tahap *post processing* dan apabila kriteria konvergensi tidak tercapai maka kembali mengulangi tahap pembuatan *meshing*.



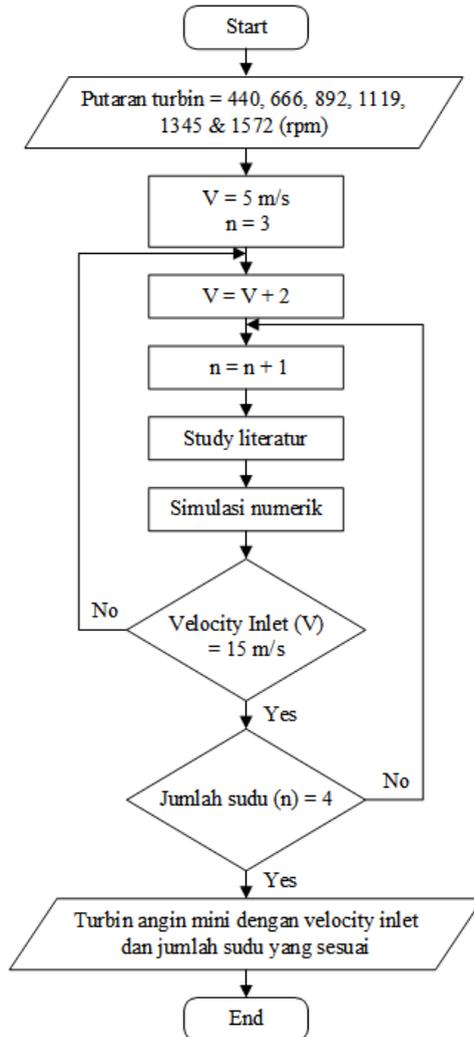
Gambar 3.8. (a) *Setting Rotation Motions* dan (b) *setting body yang diputar*

3.4. TAHAP *POST-PROCESSING*

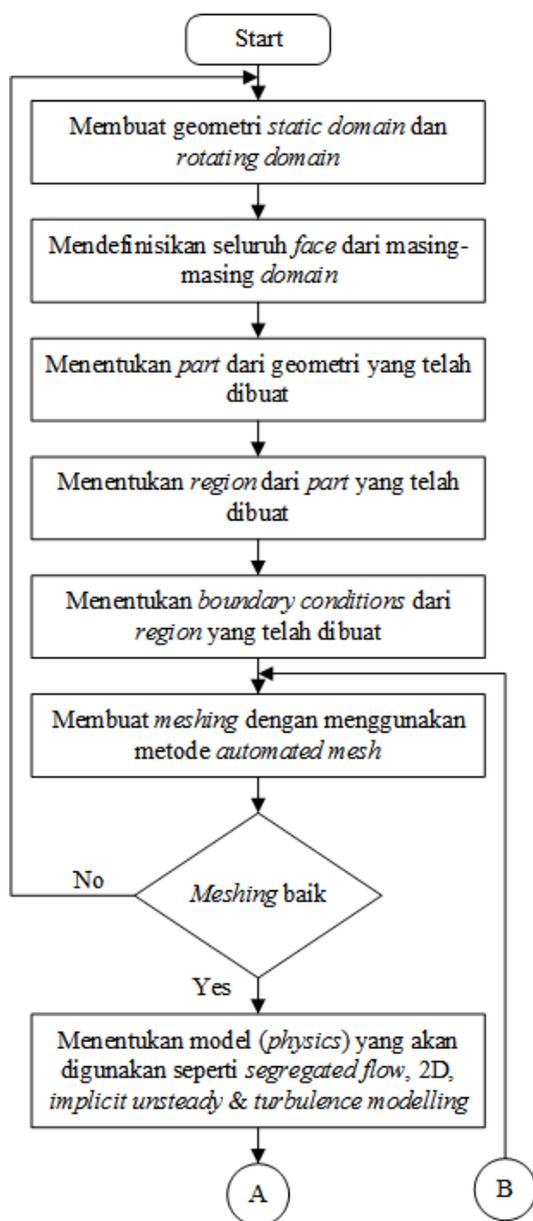
Setelah tahanan *processing* telah berhasil dilakukan, tahap selanjutnya adalah *post-processing*. Tahap ini merupakan tahap visualisasi serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kualitatif dan data kuantitatif. Data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan kontur kecepatan serta kontur tekanan, sedangkan data kuantitatif berupa grafik torsi dan koefisien daya.

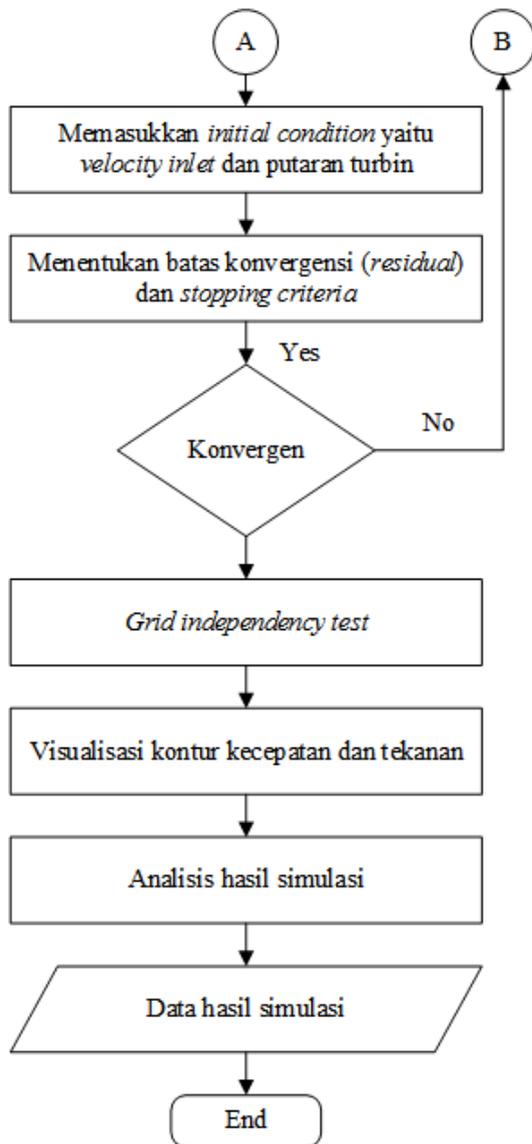
3.5. DIAGRAM ALIR

Pada penelitian ini terdapat diagram alir penelitian umum dan diagram alir simulasi numerik yang ditunjukkan sebagai berikut :



Gambar 3.9. Diagram Alir Penelitian Umum





Gambar 3.10. diagram alir simulasi numerik

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DAN DISKUSI

Bab ini berisi tentang analisis dan diskusi dari hasil simulasi numerik berupa visualisasi aliran, yaitu kontur kecepatan dan tekanan serta berupa grafik, yaitu kurva nilai koefisien torsi dan daya.

4.1. PUTARAN TURBIN DAN *TIP SPEED RATIO*

Data yang digunakan dalam simulasi ini diadaptasi dari eksperimen Dwiyantoro et al (2015) dengan mengasumsikan putaran yang sama pada kecepatan 9 m/s dan mengekstrapolasi untuk kecepatan angin yang disajikan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Data yang digunakan dalam simulasi

| Kecepatan Angin (m/s) | Putaran Turbin (rpm) | <i>Tip Speed Ratio</i> |
|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| 5 | 440 | 1,08 |
| 7 | 666 | 1,17 |
| 9 | 892 | 1,21 |
| 11 | 1119 | 1,25 |
| 13 | 1345 | 1,27 |
| 15 | 1572 | 1,28 |

4.2. *TIME STEP*

Perhitungan *time step* dilakukan untuk mengetahui berapa besarnya *time step* dalam satu putaran penuh. Pada contoh ini diambil kecepatan angin 13 m/s dengan putaran turbin 1345 rpm (140,90 rad/s) serta jumlah *frame* yang diambil adalah tiap 5° dengan *inner iteration* 1000 per *time step*. *Time step* tiap kecepatan angin disajikan pada tabel 4.2.

$$\omega = \frac{\theta - \theta_0}{\text{waktu per putaran}}$$
$$140,90 \text{ rad/s} = \frac{2\pi - 0}{\text{waktu per putaran}}$$
$$\text{Waktu per putaran} = \frac{2\pi - 0}{140,90 \text{ rad/s}} = 0,04459 \text{ s}$$

$$time\ step = \frac{waktu\ per\ putaran}{jumlah\ frame} = \frac{0,04459\ s}{72} = 0,00062\ s$$

di mana:

θ = sudut satu putaran

θ_0 = sudut nol putaran

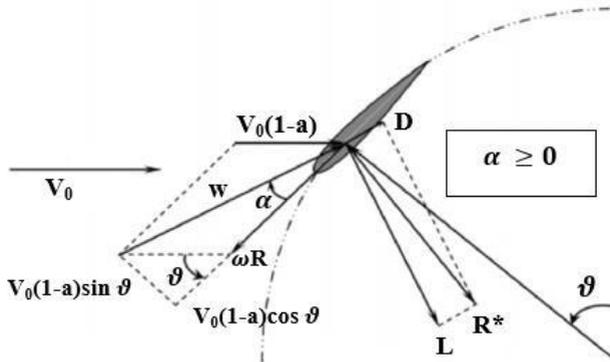
Tabel 4.2. *Time step* tiap kecepatan angin

| v (m/s) | ω (rpm) | ω (rad/s) | Jumlah <i>Frame</i> | Waktu Per Putaran (s) | <i>Time Step</i> |
|------------|-------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|----------------------|
| 5 | 440 | 46,10 | 72 | 0,13631 | 0,00189 |
| 7 | 666 | 69,77 | | 0,09005 | 0,00125 |
| 9 | 892 | 93,45 | | 0,06724 | 0,00093 |
| 11 | 1119 | 117,23 | | 0,05360 | 0,00074 |
| 13 | 1345 | 140,90 | | 0,04459 | 0,00062 |
| 15 | 1572 | 164,69 | | 0,03815 | 0,00053 |

4.3. ANALISIS KONTUR

Fenomena-fenomena yang terjadi pada turbin angin Darrieus sangat erat kaitannya dengan gaya-gaya yang bekerja pada sudu-sudu turbin angin Darrieus tersebut. Penjabaran gaya-gaya yang bekerja pada sudu turbin angin dapat dilihat pada gambar 4.1 dengan V_0 sebagai kecepatan aliran *freestream* (m/s), ω sebagai kecepatan angular rotor (s^{-1}), R sebagai jari-jari rotor (m), w sebagai kecepatan angin relatif terhadap sudu (m/s), a sebagai *interference factor*, α sebagai *angle of attack*, ϑ sebagai sudut putar sudu, L sebagai gaya *lift* (N) dan D sebagai gaya *drag* (N) serta R^* sebagai gaya resultan (N) (Brusca et al, 2014). Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa saat sudut putar sudu 0° sudu tidak memiliki *angle of attack*, semakin bertambah sudut putar sudu maka *angle of attack* pun akan semakin bertambah (untuk daerah *upstream*). *Angle of attack* ini adalah sudut yang terbentuk antara garis *chord* sudu dengan kecepatan angin relatif terhadap sudu (w), sedangkan w ini terbentuk dari resultan antara kecepatan aliran *freestream* yang mengenai sudu ($V_0(1-a)$) dengan ωR . *Angle of attack* ini akan mempengaruhi arah w, gaya *lift* dan *drag* pada sudu (dimana gaya *lift* tegak lurus terhadap w dan gaya *drag* sejajar

dengan w) dengan nilai tertentu. *Angle of attack* akan terus berkembang hingga garis $V_0(1-a)$ dengan ωR menjadi sejajar. Saat *angle of attack* terlalu besar, maka akan terbentuk *vortex* yang berkembang dari daerah *leading edge* sudu hingga *trailing edge* sudu yang akan memperlambat kecepatan sudu tersebut.



Gambar 4.1 Analisa gaya-gaya yang bekerja pada sudu turbin angin Darrieus pada sudut putar tertentu (Brusca et al, 2014) Simulasi dilakukan pada kondisi dua dimensi, *unsteady* dan *rotating*, dengan putaran turbin dan TSR seperti pada tabel 4.1 serta *time step* yang dihitung di tiap kecepatan angin yang nilainya disajikan pada table 4.2. Hasil yang dianalisis secara kualitatif adalah kontur kecepatan dan tekanan. Sedangkan untuk analisis secara kuantitatif berupa grafik yaitu, torsi terhadap sudut, torsi rata-rata terhadap kecepatan angin, dan koefisien daya terhadap TSR.

4.3.1. Kontur Kecepatan

Untuk mempermudah analisa pada turbin angin Darrieus tiga sudu, maka digunakan skema seperti ditunjukkan pada gambar 4.2 dengan acuan sudut putar θ dari sudu 1.

Gambar 4.3 menunjukkan kontur kecepatan turbin angin Darrieus tiga sudu pada berbagai sudut putar dengan kecepatan angin 15 m/s. Pada gambar kontur kecepatan tersebut, sudu 1 pada sudut putar 0° tidak memiliki *angle of attack* yang mengakibatkan tidak adanya gaya *lift* yang terjadi dan torsi yang terbentuk pun

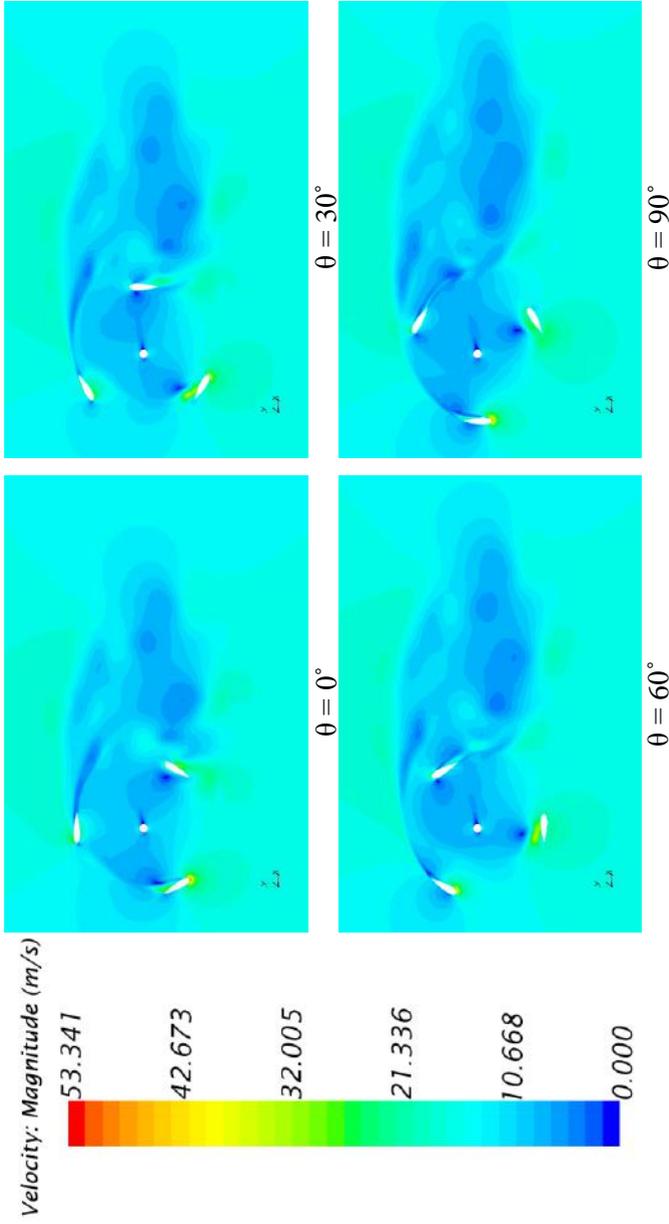
bernilai minus dikarenakan gaya *drag* pada kondisi ini tidak bernilai nol. Hal ini sesuai dengan hasil dari penelitian Gorle et al. (2016). Pertambahan sudut putar akan menambah nilai *angle of attack* dan mempengaruhi gaya *lift* yang terjadi. Ketika sudu 1 mencapai sudut putar 90° , gaya *lift* yang terbentuk lebih besar daripada posisi sudut putar sebelumnya sehingga mengakibatkan kecepatan pada sudu 1 meningkat dan mampu memutar turbin lebih baik. Semakin besar gaya *lift* maka semakin besar pula torsi yang dihasilkannya.

Pada sudut putar 90° mulai muncul *vortex* yang relatif kecil yang seolah menempel di sisi bagian dalam sudu 1 seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.4. *Vortex* inilah yang menyebabkan penurunan gaya *lift* pada sudu sehingga kecepatannya pun menurun. *Vortex* ini semakin membesar dan mulai terlepas dari sudu 1 mulai sudut putar 120° . Akan tetapi pada sudut putar 120° ini, jarak *vortex* dengan sudu masih sangat dekat, sehingga efek yang ditimbulkannya kemungkinan masih berpengaruh pada sudu 1. Pada sudut putar 150° hingga kisaran sudut putar 180° *vortex* yang terjadi tidak lagi mempengaruhi sudu 1 karena jaraknya yang terlampaui jauh, sehingga pada kondisi ini kecepatan sudu 1 mulai meningkat kembali walaupun tidak setinggi pada sudut putar 90° . Peningkatan kecepatan ini juga dipengaruhi oleh kecepatan *freestream* yang searah dengan kecepatan tangensial sudu 1 sehingga mampu meningkatkan kecepatan sudu hingga titik tertentu. Pada sudut putar 210° *vortex* yang terbentuk kembali mendekati sudu 1 hingga akhirnya menempel pada sisi bagian dalam sudu 1 pada sudut putar 240° , kemudian *vortex* ini menghilang dengan cepat. Mendekatnya *vortex* pada sudu 1 ini menandakan adanya penurunan kecepatan kembali hingga mencapai kecepatan terendahnya pada sudut putar 240° , setelah sebelumnya mengalami sedikit peningkatan. Setelah melewati sudut putar 240° kecepatan sudu 1 berangsur konstan hingga mencapai sudut putar 360° dikarenakan tidak ada *vortex* yang terbentuk, akan tetapi kecepatan aliran di sekitar sudu 1 rendah karena angin yang mengalir pada daerah *downstream* tidak secepat pada daerah *upstream*.

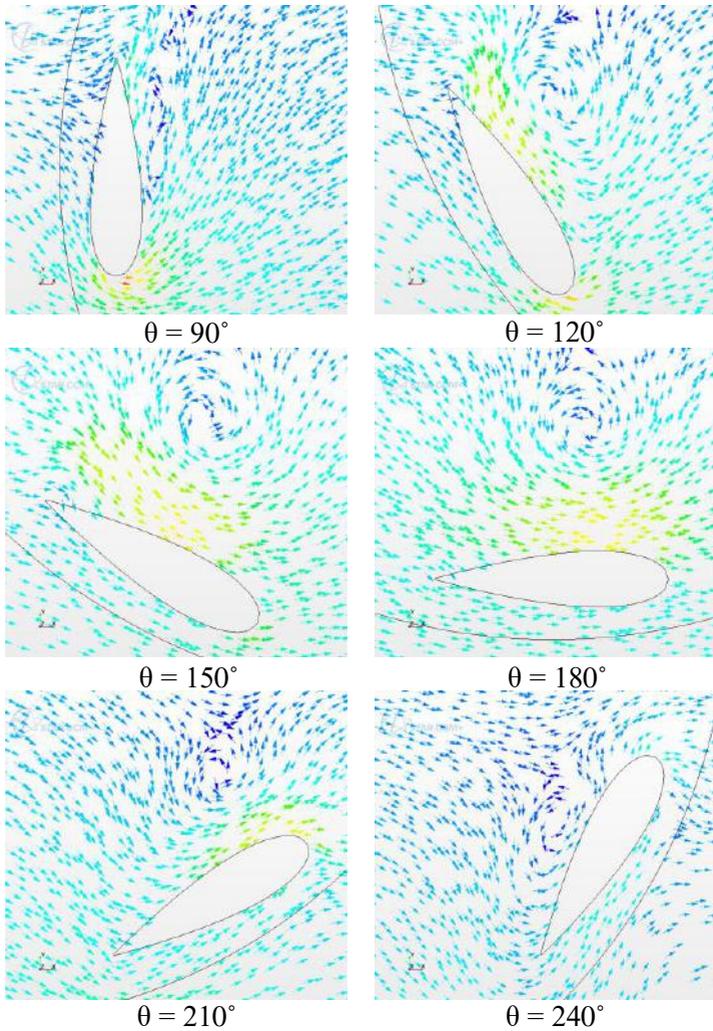
Fenomena yang terjadi pada sudu 2 dan sudu 3 pada turbin angin Darrieus tiga sudu ini memiliki kemiripan dengan fenomena sudu 1 pada sudut putar 120° dan 240° . Posisi salah satu sudu pada nilai sudut putar tertentu juga mempengaruhi kecepatannya serta gaya *lift* dan *drag* yang dihasilkannya, karena bisa jadi posisi salah satu sudu terhalang oleh sudu lainnya yang akan menurunkan kecepatan *freestream* yang mengenai sudu tersebut. Fenomena lainnya yang terjadi adalah, kecepatan maksimal pada sudut putar 0° sedikit lebih tinggi daripada saat sudut putar 90° , yaitu berturut-turut 53,341 m/s dan 49,095 m/s. Kemungkinan hal ini terjadi karena kecepatan sudu 1 pada sudut putar 90° terganggu oleh sudu 2 yang mulai didekati oleh *vortex* pada bagian dalam sudunya dan sudu 3 yang memiliki arah kecepatan tangensial hampir berlawanan dengan arah kecepatan *freestream*, dibandingkan dengan kecepatan sudu 2 pada sudut putar 0° yang hanya terganggu oleh sudu 3 yang membentuk sedikit *vortex* dan kecepatan yang rendah karena posisinya terhalang oleh sudu 2, sedangkan pada sudu 1 tidak terbentuk *vortex* pada *trailing edge* nya.



Gambar 4.2 Skema turbin angin Darrieus tiga sudu

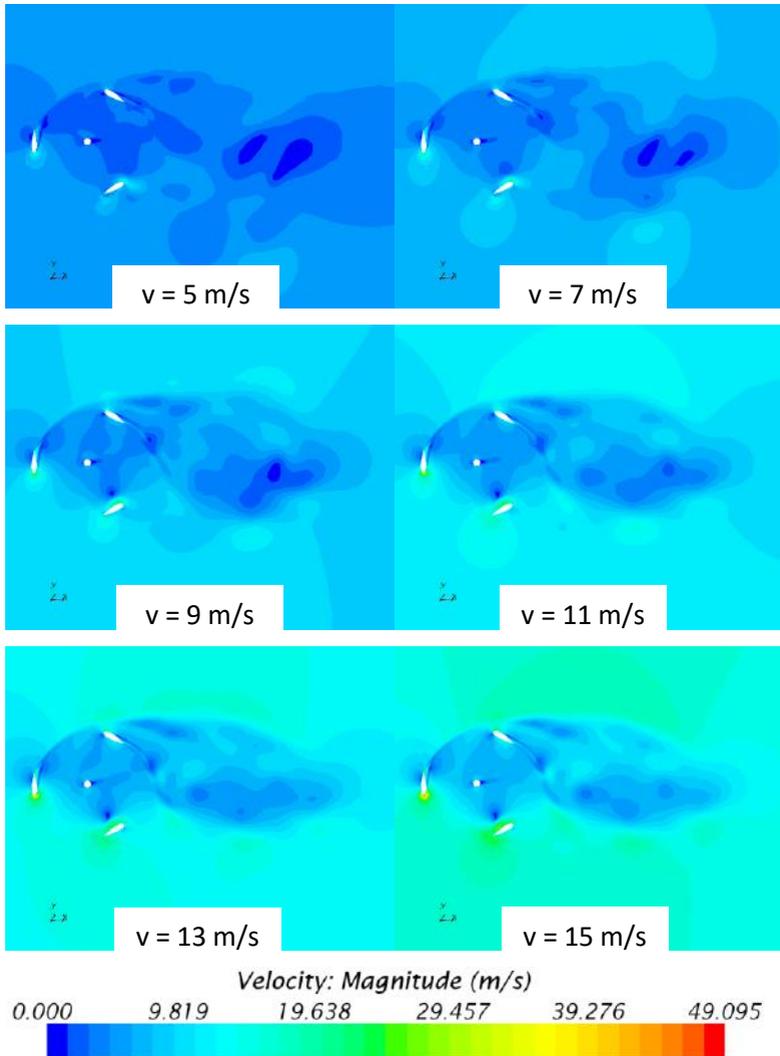


Gambar 4.3. Kontur kecepatan turbin angin Darrieus tiga sudu pada berbagai sudut putar dengan kecepatan *freestream* 15 m/s



Gambar 4.4. Vektor kecepatan yang menunjukkan kemunculan *vortex* pada sudu 1 turbin angin Darrieus tiga sudu pada kecepatan *freestream* 15 m/s

Gambar 4.5 menunjukkan kontur kecepatan turbin angin Darrieus tiga sudu pada sudut putar 90° dengan kecepatan angin 5,



Gambar 4.5. Kontur kecepatan turbin angin Darrieus tiga sudu pada sudut putar $\theta = 90^\circ$ dengan variasi kecepatan *freestream*

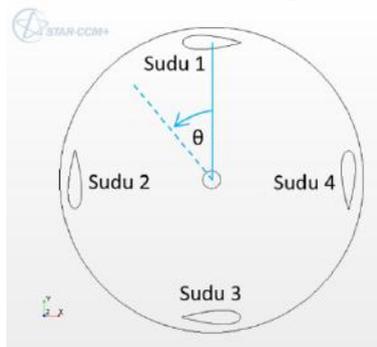
7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Pada gambar tersebut, ada penambahan kontur *wake* yang jelas dan peningkatan kecepatan angin pada daerah *leading edge* sudu 1 seiring dengan peningkatan kecepatan aliran *freestream*, akan tetapi perubahan yang terjadi pada kontur aliran pada kecepatan aliran 13 m/s dan 15 m/s relatif kecil. Mengembangnya kontur *wake* ini menandakan adanya pertambahan kecepatan total pada turbin angin dan peningkatan nilai torsi yang dihasilkannya. Terlepas dari perubahan kontur aliran dengan meningkatnya kecepatan *freestream*, tidak ada perbedaan yang berarti pada kondisi aliran dengan variasi kecepatan *freestream* tersebut.

Untuk mempermudah analisa pada turbin angin Darrieus empat sudu, maka digunakan skema seperti ditunjukkan pada gambar 4.6 dengan acuan sudut θ dari sudu 1.

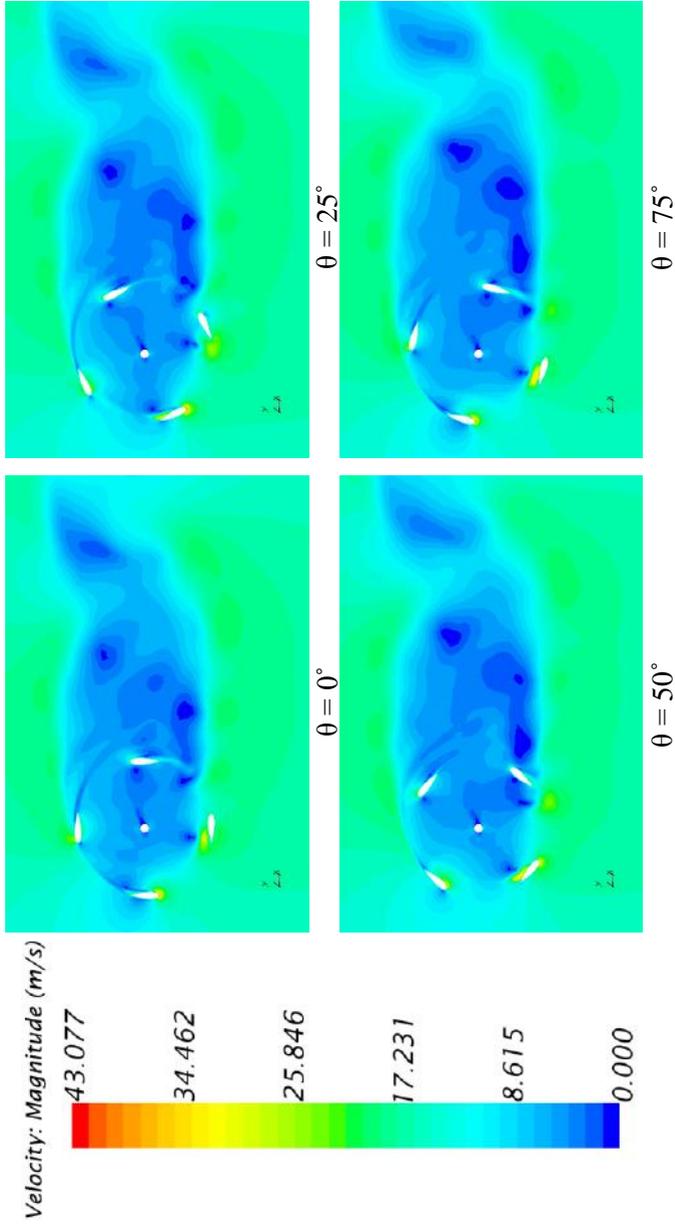
Gambar 4.7 menunjukkan kontur kecepatan turbin angin Darrieus empat sudu pada berbagai sudut dengan kecepatan angin 15 m/s. Sama seperti pada turbin angin Darrieus tiga sudu, sudu 1 pada sudut putar 0° dan 180° tidak memiliki *angle of attack* sehingga tidak ada gaya *lift* yang terjadi pada sudu 1 dan torsi nya bernilai negatif atau sangat kecil pada posisi 0° dan 180° ini. Ketika sudu 1 mencapai sudut putar 90° , gaya *lift* yang terbentuk lebih besar karena dipengaruhi oleh *angle of attack* yang semakin membesar sehingga mengakibatkan kecepatan pada sudu 1 meningkat dan mampu memutar turbin lebih baik. Semakin besar gaya *lift* maka semakin besar pula torsi yang dihasilkannya. Pada sudut putar sekitar 180° sudu 1 mendapatkan dorongan dari kecepatan *freestream* yang searah dengan kecepatan tangensial sudu, sehingga nilai kecepatan sudu 1 pada daerah ini sedikit meningkat hingga akhirnya turun kembali karena dipengaruhi oleh *vortex* yang terbentuk. Pada sudut putar 270° hingga 360° tidak ada *vortex* yang terbentuk dan kecepatan angin yang mengenai sudu pada daerah ini lemah sehingga kecepatan yang terjadi pun tidak tinggi. Analisa pada sudu 2, 3 dan 4 pada turbin angin Darrieus empat sudu ini hampir sama dengan analisa pada sudu 1 dengan sudut putar 90° , 180° dan 270° .

Fenomena perkembangan *vortex* dan penambahan kecepatan pada turbin angin Darrieus empat sudu ini tidak jauh berbeda daripada turbin angin Darrieus tiga sudu seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4. Hanya saja pada turbin angin Darrieus empat sudu terdapat lebih banyak sudu yang berada di daerah *downstream*, sehingga akan lebih mempengaruhi sudu yang berada di daerah *upstream*. Hal inilah yang mengakibatkan kecepatan maksimum pada sudu turbin angin Darrieus empat sudu tidak setinggi kecepatan maksimum pada sudu turbin angin Darrieus tiga sudu, begitupun gaya *lift* dan torsi yang dihasilkannya.

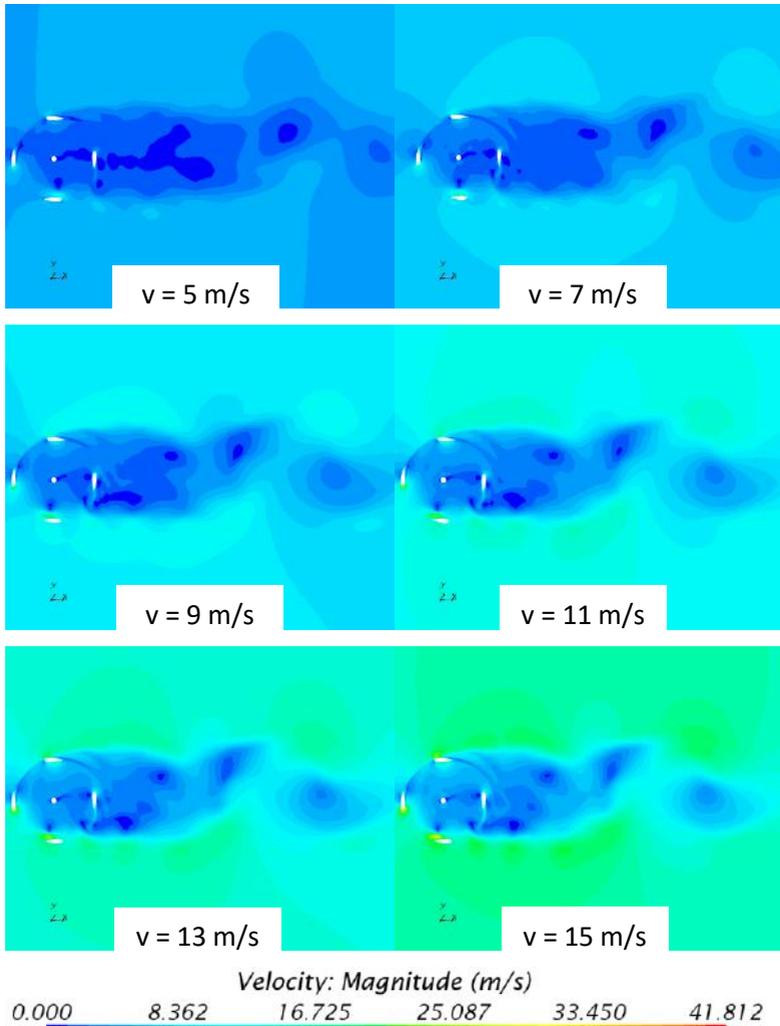
Fenomena lain yang terjadi pada turbin angin Darrieus 4 sudu ini yaitu kecepatan sudu pada sudut putar 25° sedikit lebih tinggi daripada kecepatan sudu pada 0° , yaitu berturut-turut 43,077 m/s dan 41,812 m/s. Kemungkinan hal ini terjadi karena pada sudut putar 0° , sudu yang paling berpengaruh pada putaran turbin adalah sudu 2, karena sudu 1 dan 3 sejajar dengan aliran *freestream* sehingga tidak memiliki gaya *lift*, dan sudu 4 yang tidak terlalu berdampak besar karena terhalang oleh sudu 2 pada daerah *upstream*. Sedangkan pada sudut putar 25° , sudu yang berpengaruh pada putaran turbin tidak hanya sudu 2, tetapi sudu 1, sudu 3 dan sudu 4 juga karena sudah memiliki *angle of attack*, walaupun sudu 3 dan 4 tidak terlalu berpengaruh karena berada pada sisi *downstream* dan memiliki kecepatan yang lebih rendah.



Gambar 4.6 Skema turbin angin Darrieus empat sudu



Gambar 4.7. Kontur kecepatan turbin angin Darrieus empat sudu pada berbagai sudut putar dengan kecepatan *freestream* 15 m/s

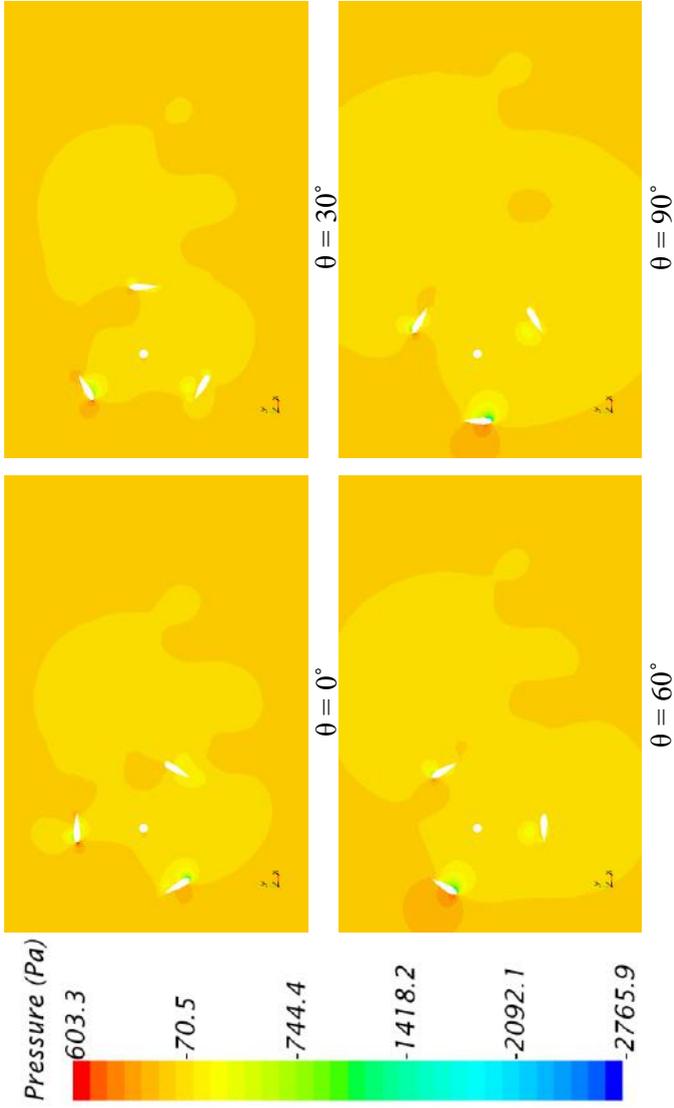


Gambar 4.8. Kontur kecepatan turbin angin Darrieus empat sudu pada sudut putar $\theta = 0^\circ$ dengan variasi kecepatan *freestream*

Gambar 4.8 menunjukkan kontur kecepatan turbin angin Darrieus empat sudu pada sudut $\theta = 0^\circ$ dengan kecepatan angin 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Pada gambar tersebut, ada penambahan kontur *wake* yang jelas dan peningkatan kecepatan angin pada ujung sudu mulai $v = 5$ m/s hingga $v = 9$ m/s, sedangkan pada $v = 9$ m/s hingga $v = 15$ m/s hanya terlihat peningkatan kecepatan angin pada ujung sudu dan sekitarnya dengan perubahan kontur aliran yang relatif kecil. Mengembangnya kontur *wake* ini menandakan adanya pertambahan kecepatan total pada turbin angin dan peningkatan nilai torsi yang dihasilkannya. Terlepas dari perubahan kontur aliran dengan meningkatnya kecepatan *freestream*, tidak ada perbedaan yang berarti pada kondisi aliran dengan variasi kecepatan *freestream* tersebut.

4.3.2. Kontur Tekanan

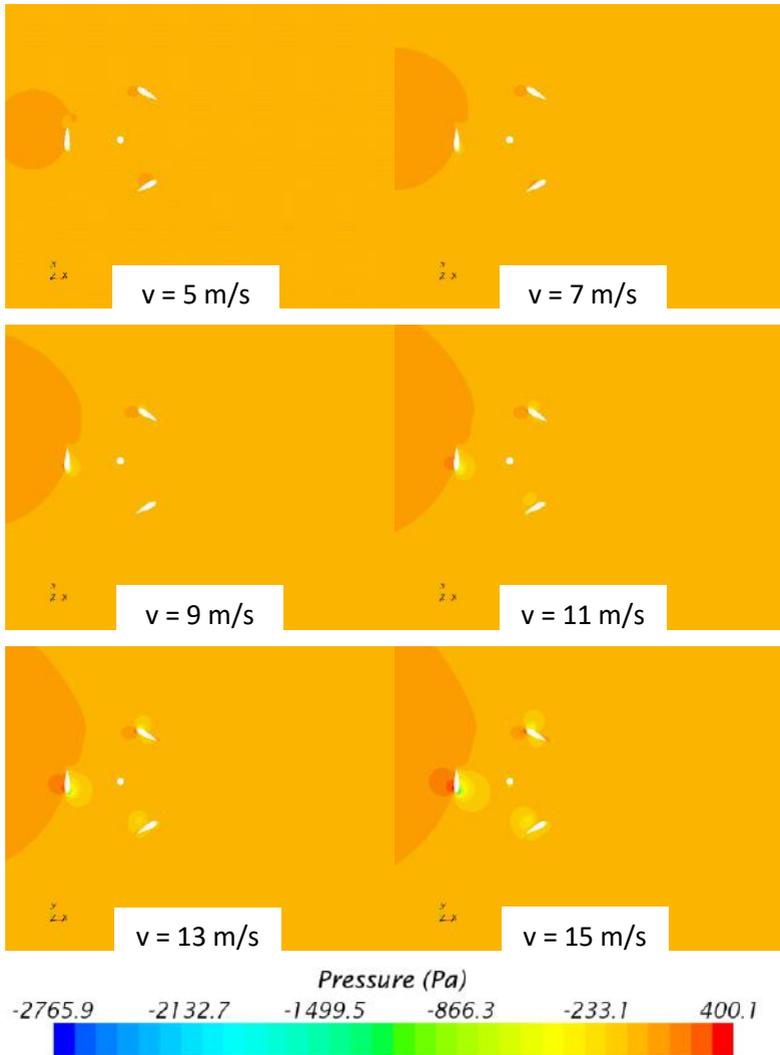
Gambar 4.9 menunjukkan kontur tekanan turbin angin Darrieus tiga sudu pada berbagai sudut putar dengan kecepatan angin 15 m/s. Pada kontur tekanan tersebut terlihat bahwa tekanan tertinggi pada sudu 1 pada sudut putar 0° terletak pada ujung sudu atau *leading edge*. Hal ini menyebabkan tidak adanya gaya *lift* yang terjadi dikarenakan tidak ada perbedaan tekanan yang signifikan antara permukaan terluar sudu dengan permukaan terdalamnya. Fenomena ini terjadi karena *angle of attack* pada saat sudut putar 0° bernilai 0 dan sudu yang digunakan adalah jenis sudu simetris (NACA 0024). Seiring bertambahnya sudut putar, semakin terlihat perkembangan kontur tekanan pada sisi terluar sudu yang berhubungan langsung dengan aliran *freestream*, misalnya saja kontur tekanan pada sisi terluar sudu 1 yang semakin berkembang dan semakin terlihat jelas perbedaannya dengan sisi terdalam sudu 1, yang berakibat pada terjadinya gaya *lift* yang semakin besar yang mengarah kedalam turbin dan membentuk sudut tertentu dengan jari-jari turbin sesuai dengan besar *angle of attack* yang terbentuk. Hal ini terjadi pada sudu 1 hingga sudut putar 90° . Pada sudut putar 120° sudu 1 pun terlihat memiliki perbedaan tekanan pada sisi terluar sudu dengan sisi terdalamnya, akan tetapi tidak sebesar saat sudut putar mencapai 90° .



Gambar 4.9. Kontur tekanan turbin angin Darrieus tiga sudu pada berbagai sudut dengan kecepatan *freestream* 15 m/s

Pada sudut putar 150° hingga 210° terlihat bahwa tidak ada perbedaan tekanan yang signifikan pada daerah sekitar sudu, bahkan ada *vortex* yang terbentuk di daerah sekitar sudu, yang akan menghambat perputaran sudu turbin. Ketika sudu 1 mencapai sudut putar 240° hingga 360° , perbedaan tekanan yang terjadi di daerah ini pun tidak terlalu tinggi, karena aliran yang berada pada daerah ini (daerah *downstream*) adalah aliran lemah yang hampir kehilangan kecepatan dan tekanannya dikarenakan terhalang oleh sudu-sudu yang berada di daerah *upstream*. Hal ini mengakibatkan gaya *lift* yang dihasilkan relatif kecil. Akan tetapi sudu 1 terlihat memiliki tekanan yang sedikit lebih tinggi pada ujung sudunya saat mencapai sudut putar 330° karena aliran yang mengenainya tidak terhalang oleh sudu lainnya. Fenomena yang terjadi pada sudu 2 dan sudu 3 memiliki kemiripan dengan sudu 1 saat mencapai sudut putar 120° dan 240° .

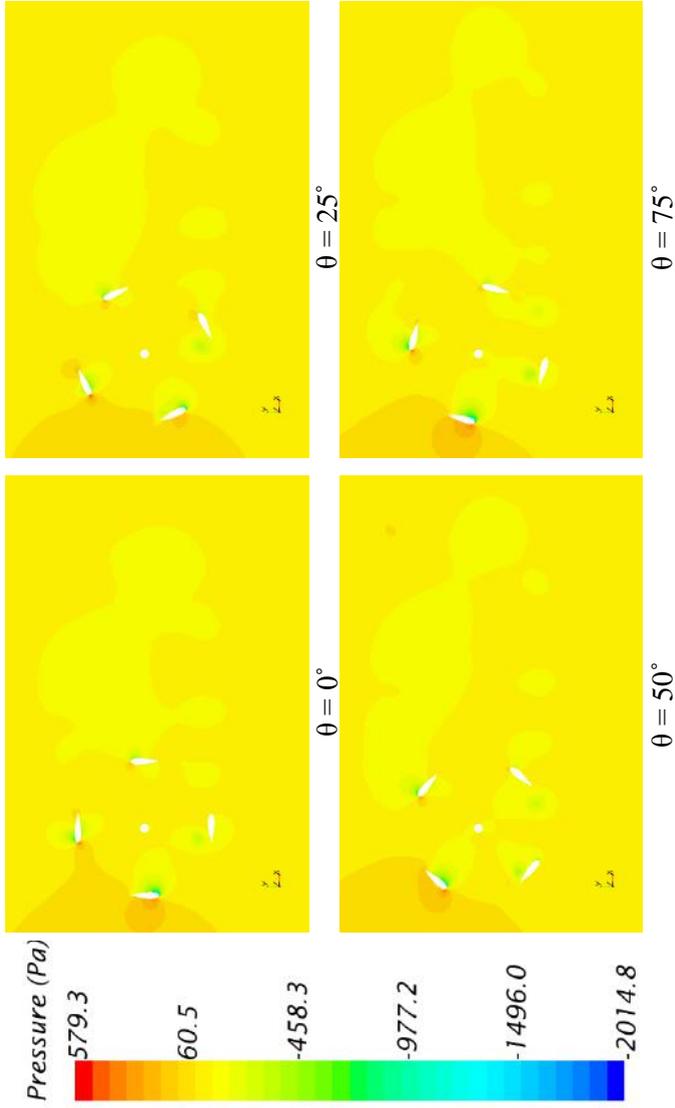
Gambar 4.10 menunjukkan kontur tekanan turbin angin Darrieus tiga sudu pada sudut $\theta = 90^\circ$ dengan kecepatan angin 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Pada gambar tersebut, tidak ada perubahan kontur yang signifikan, kecuali pada sudu 1. Pada sudu 1 terlihat kontur tekanan yang semakin membesar seiring dengan bertambahnya kecepatan angin *freestream*. Kemudian terlihat juga perbedaan tekanan yang terjadi antara sisi terluar dan terdalam sudu 1 yang semakin meningkat bersamaan dengan bertambahnya kecepatan angin *freestream*. Sedangkan pada kedua sudu lainnya tidak terjadi perbedaan tekanan yang menonjol walaupun kecepatan angin *freestream* meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa sudu yang paling berpengaruh terhadap putaran turbin dan terhadap torsi yang dihasilkan adalah sudu pada daerah *upstream*, karena berhadapan langsung dengan aliran angin *freestream* yang datang. Sedangkan sudu-sudu pada daerah *downstream* hanya menerima aliran yang telah mengenai sudu-sudu pada daerah *upstream* sehingga aliran ini tidak sekuat aliran *freestream*, dan berdampak pada gaya *lift* dan torsi yang dihasilkan oleh sudu-sudu daerah *downstream* tersebut.



Gambar 4.10. Kontur tekanan turbin angin Darrieus tiga sudu pada sudut putar $\theta = 90^\circ$ dengan variasi kecepatan *freestream*

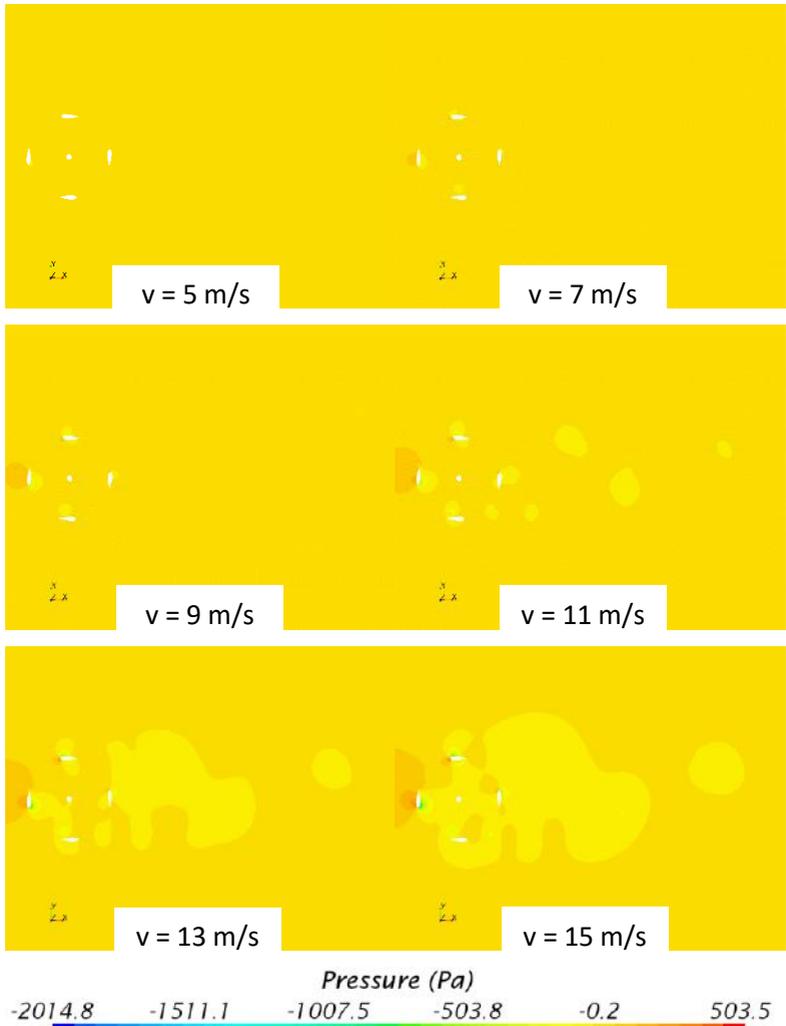
Gambar 4.11 menunjukkan kontur tekanan turbin angin Darrieus empat sudu pada berbagai sudut dengan kecepatan angin 15 m/s. Sama seperti pada turbin angin Darrieus tiga sudu, sudu 1 pada sudut putar 0° memiliki tekanan tertinggi pada ujung sudu atau *leading edge*. Hal ini menyebabkan tidak adanya gaya *lift* yang terjadi dikarenakan tidak ada perbedaan tekanan yang signifikan antara permukaan terluar sudu dengan permukaan terdalamnya. Ketika sudu 1 mencapai sudut putar 90° terlihat perbedaan tekanan yang signifikan pada sisi terluar sudu dengan sisi terdalamnya, sehingga gaya *lift* yang terbentuk menjadi lebih besar mengingat posisi sudu yang tegak lurus terhadap aliran *freestream* memberikan efek tekanan yang besar pada sisi terluar sudu setelah ditumbuk oleh aliran *freestream*. Semakin besar gaya *lift* maka semakin besar pula torsi yang dihasilkannya. Setelah melewati sudut putar 90° perbedaan tekanan yang terjadi pada sudu 1 semakin menurun hingga mencapai sudut putar sekitar 180° , hanya terlihat *vortex* yang terbentuk disekitar sudu.

Pada kondisi sudut putar 180° hingga 360° hanya terjadi perbedaan tekanan yang kecil, dikarenakan aliran yang berada pada daerah *downstream* ini tidak mampu memberikan tekanan yang kuat pada sudu, sehingga gaya *lift* yang dihasilkannya pun bernilai kecil. Fenomena pada sudu 2, 3 dan 4 pada turbin angin Darrieus empat sudu ini memiliki kemiripan dengan sudu 1 saat mencapai sudut putar 90° , 180° dan 270° . Perbedaan yang terjadi antara kontur tekanan turbin angin Darrieus tiga sudu dengan empat sudu yaitu tekanan maksimum pada sudu turbin angin Darrieus empat sudu tidak setinggi tekanan maksimum pada sudu turbin angin Darrieus tiga sudu, dikarenakan pada turbin angin Darrieus empat sudu terdapat 2 sudu yang terletak pada daerah *downstream* yang menjadi penghambat putaran dari turbin angin ini, dikarenakan perbedaan tekanan pada sisi-sisi kedua sudu tersebut tidak terlalu besar bahkan terdapat tekanan rendah pada sisi *trailing edge* nya karena adanya *vortex* yang terbentuk. Sedangkan turbin angin Darrieus tiga sudu hanya memiliki 1 sudu sebagai penghambatnya, saat kedua sudunya berada di daerah *upstream*.



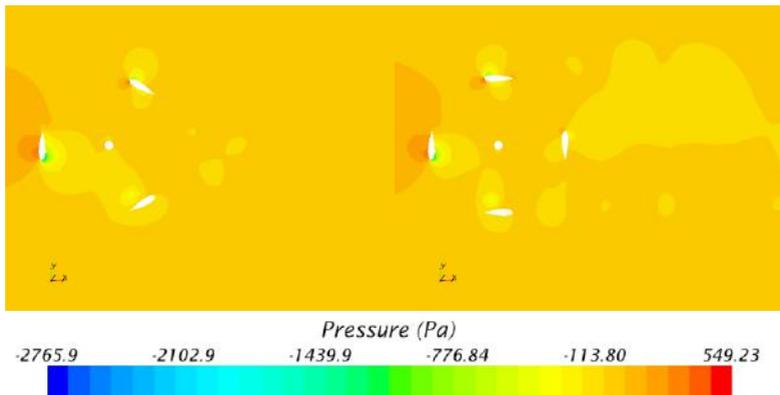
Gambar 4.11. Kontur tekanan turbin angin Darrieus empat sudu pada berbagai sudut dengan kecepatan *freestream* 15 m/s

Gambar 4.12 menunjukkan kontur tekanan turbin angin Darrieus empat sudu pada sudut $\theta = 0^\circ$ dengan kecepatan angin 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Pada gambar tersebut terjadi perubahan kontur yang signifikan pada setiap sudunya, terutama pada sudu 2 pada daerah *upstream* yang tegak lurus terhadap aliran *freestream*. Pada sudu 2 terlihat kontur tekanan yang semakin membesar seiring dengan bertambahnya kecepatan angin *freestream*. Kemudian terlihat juga perbedaan tekanan yang terjadi antara sisi terluar dan terdalam sudu 2 yang semakin meningkat bersamaan dengan bertambahnya kecepatan angin *freestream*. Sedangkan perbedaan tekanan yang terjadi pada ketiga sudu lainnya juga bertambah bersamaan dengan bertambahnya kecepatan angin *freestream*, walaupun tidak lebih menonjol daripada perbedaan tekanan pada sudu 2. Hal ini menunjukkan bahwa sudu yang paling berpengaruh terhadap putaran turbin dan terhadap torsi yang dihasilkan adalah sudu pada daerah *upstream*, karena berhadapan langsung dengan aliran angin *freestream* yang datang dari arah inlet. Sedangkan sudu-sudu pada daerah *downstream* hanya menerima aliran yang telah mengenai sudu-sudu pada daerah *upstream* sehingga aliran ini tidak sekuat aliran *freestream*, dan berdampak pada gaya *lift* dan torsi yang dihasilkan oleh sudu-sudu daerah *downstream* tersebut. Kemudian terlihat pula kontur tekanan yang lemah yang mulai membesar dan meninggalkan turbin sejak $v = 11$ m/s hingga $v = 15$ m/s, yang menandakan terbentuknya *wake* dari turbin ini dan membuktikan bahwa gaya *lift* semakin meningkat bersamaan dengan semakin bertambahnya kecepatan angin *freestream* yang mengenai turbin angin, dan tentunya akan meningkatkan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus ini.



Gambar 4.12. Kontur tekanan turbin angin Darrieus empat sudu pada sudut putar $\theta = 0^\circ$ dengan variasi kecepatan *freestream*

Pada gambar 4.13 terlihat komparasi kontur tekanan pada turbin angin Darrieus tiga sudu dan empat sudu setelah colormap, sudut putar dan kecepatan *freestream* disamakan. Pada gambar tersebut terlihat bahwa perbedaan tekanan terbesar antara bagian terluar sudu dan bagian terdalamnya sama-sama terjadi pada sudu 1 yang tegak lurus terhadap arah kecepatan aliran *freestream* pada daerah *upstream*. Sehingga pada sudu ini terjadi gaya *lift* yang cukup besar dan menghasilkan torsi yang besar pula. Sedangkan untuk sudu-sudu lainnya pada turbin angin Darrieus tiga sudu maupun empat sudu, terlihat adanya *vortex* dan *wake* yang terbentuk pada salah satu sisi sudu. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* yang terjadi pada sudu-sudu tersebut menjadi besar dan gaya *lift* nya menurun, sehingga torsi yang dihasilkan oleh sudu-sudu tersebut bernilai kecil.



Gambar 4.13. Komparasi kontur tekanan turbin angin Darrieus tiga sudu dan empat sudu pada sudut putar 90° dengan kecepatan *freestream* 15 m/s

4.4. ANALISIS TORSI

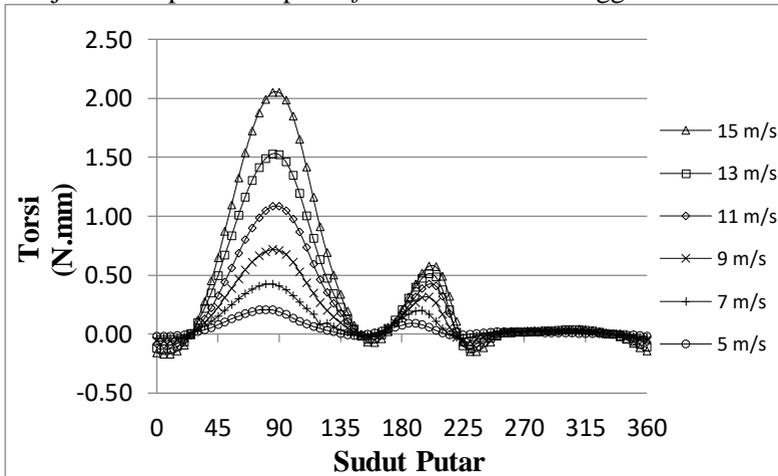
4.4.1. Torsi Pada Tiap Sudut Putar

Gambar 4.14 menunjukkan grafik torsi terhadap sudut putar 0° hingga 360° yang dianalisa pada sudu 1 saja pada turbin angin Darrieus tiga sudu, dengan variasi kecepatan angin *freestream*. Berdasarkan gambar grafik tersebut, grafik torsi yang

dihasilkan pada sudu 1 memiliki profil yang seragam, dengan nilai torsi minus pada sudut putar 0° hingga 25° pada semua kecepatan angin *freestream*, yang disebabkan karena tidak adanya gaya *lift* yang terjadi pada posisi ini. Setelah itu grafik torsi mulai meningkat mulai sudut putar 25° hingga 85° - 90° karena gaya *lift* mulai mampu melawan gaya *drag* sejak sudut putar 25° ini sehingga menghasilkan torsi yang terus naik hingga mencapai nilai maksimal pada sudut putar 85° dan 90° untuk $v = 11$ m/s. Setelah mencapai titik maksimumnya, nilai torsi terus turun hingga mencapai sudut putar 155° - 160° karena dipengaruhi *vortex* yang terbentuk di sisi terdalam sudu. Mulai dari sudut putar 160° ini nilai torsi mulai naik kembali hingga sudut putar 190° - 200° karena *vortex* yang terbentuk mulai menjauhi sudu, dan turun kembali hingga menghasilkan torsi bernilai minus pada sudut putar 220° - 230° dikarenakan *vortex* yang terbentuk kembali mendekati sudu dan menempel pada sisi terdalam sudu. Sejak sudut putar 230° terlewati, *vortex* yang terbentuk sebelumnya menghilang dengan cepat sehingga nilai torsi kembali naik dan stabil pada range rendah yaitu $0,01 - 0,02$ N.mm dengan nilai torsi maksimum di daerah *downstream* ini terletak pada sudut putar 300° - 310° . Grafik torsi mulai turun kembali sejak sudut putar 310° hingga 360° karena gaya *drag* pada daerah ini lebih besar daripada gaya *lift* yang terjadi.

Setelah memasuki daerah *downstream*, sudu 1 ini memiliki nilai torsi yang cukup rendah dikarenakan aliran yang mengenai sudu pada daerah ini tidak sekuat aliran pada daerah *upstream*. Dari kesemua fenomena gaya *lift* yang terjadi pada setiap sudu, dapat diketahui bahwa faktor yang paling mempengaruhi gaya *lift* ini adalah besarnya aliran angin yang mengenai sudu dan besarnya *angle of attack*. Kombinasi kecepatan angin *freestream* dan *angle of attack* yang sesuai akan menghasilkan gaya *lift* yang optimal. Dan nilai resultan gaya *lift* dengan gaya *drag* inilah yang akan menentukan besarnya nilai torsi yang diproduksi. Kemudian fenomena lainnya yang terjadi yaitu adanya pergeseran nilai maksimum torsi akibat penambahan kecepatan angin *freestream*. Hal ini dapat terlihat pada saat kecepatan *freestream* 7 m/s - 15 m/s

nilai maksimum torsi bergeser dari 80° menjadi 85° , dan pada daerah *downstream* saat kecepatan *freestream* 9 m/s hingga 15 m/s nilai torsi maksimum bergeser dari sudut putar 195° menjadi 200° , serta pergeseran nilai maksimum torsi pada sudut putar 300° menjadi 310° pada kecepatan *freestream* 7 m/s hingga 15 m/s.

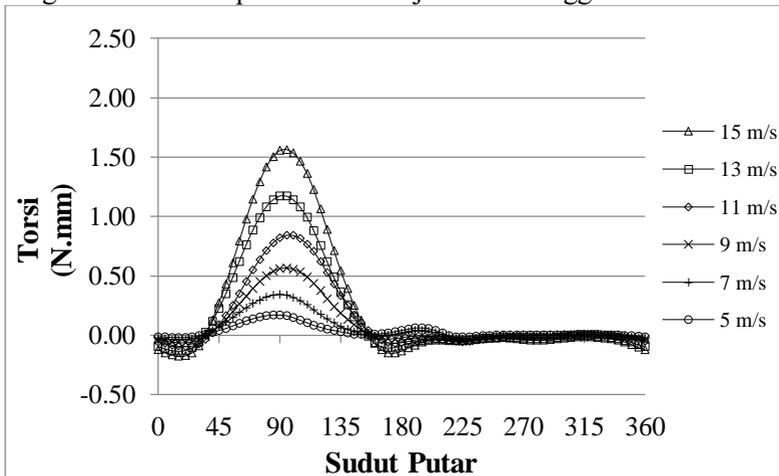


Gambar 4.14. Grafik torsi terhadap sudut putar sudu 1 pada turbin angin Darrieus tiga sudu dengan variasi kecepatan *freestream*

Gambar 4.15 menunjukkan grafik torsi terhadap sudut putar 0° hingga 360° yang dianalisa pada sudu 1 pada turbin angin Darrieus empat sudu, dengan variasi kecepatan angin *freestream*. Berdasarkan gambar grafik berikut, profil grafik torsi yang dianalisa pada sudu 1 turbin angin Darrieus empat sudu ini memiliki kesamaan dengan profil grafik torsi pada turbin angin Darrieus tiga sudu diatas. Grafik torsi bernilai tinggi saat sudu berada di daerah *upstream* dan bernilai sangat kecil saat berada pada daerah *downstream*. Hanya saja ada beberapa perbedaan nilai dan posisi pada titik tertinggi dan terendah pada setiap sudut putar sudu turbin angin ini. Pada sudu 1 sudut putar 0° hingga $30^\circ - 35^\circ$ memiliki nilai torsi minus, kemudian meningkat dengan cepat hingga mencapai nilai maksimumnya pada sudut putar $85^\circ - 95^\circ$. Setelah mencapai nilai puncaknya, grafik torsi terus menurun hingga bernilai minus pada sudut putar $160^\circ - 175^\circ$ dan kembali

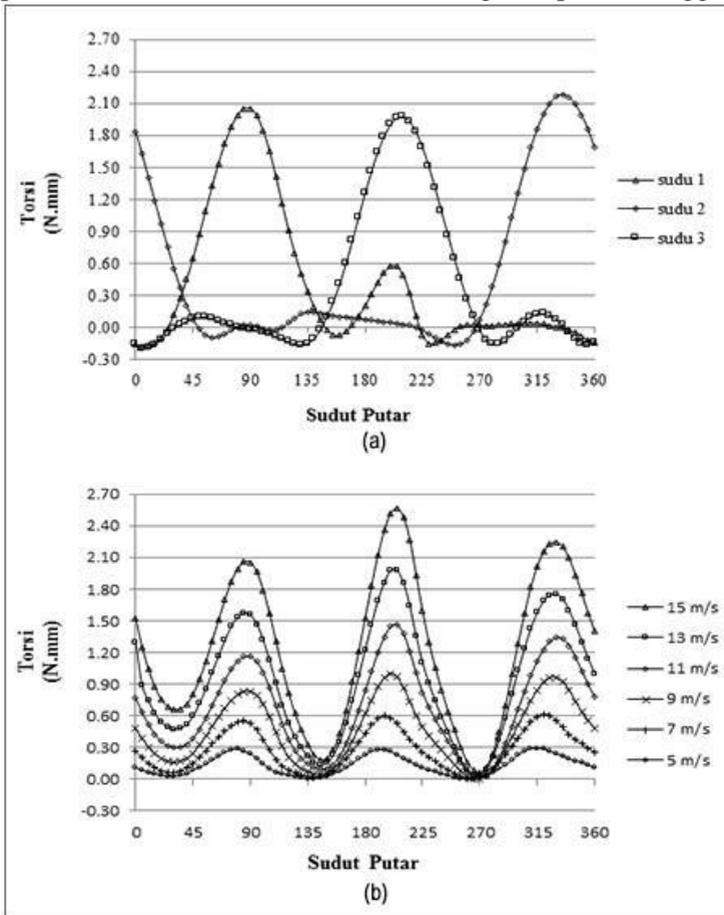
naik hingga mencapai nilai maksimal pada daerah *downstream* pada sudut putar 195° - 210° . Grafik torsi turbin angin ini kembali mengalami sedikit penurunan hingga mencapai sudut putar 225° dan mulai stabil di range bawah hingga sudut putar 325° . Setelah melalui sudut putar 325° ini, nilai torsi kembali turun hingga bernilai negatif pada sudut putar 360° .

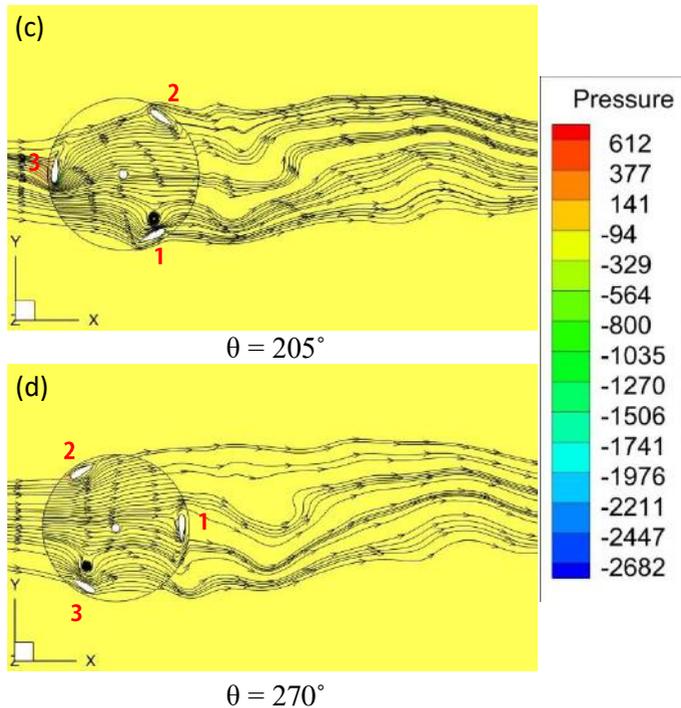
Pada turbin angin Darrieus empat sudu ini, fenomena gaya *lift* yang terjadi pada setiap sudu juga sangat dipengaruhi oleh besarnya aliran angin yang mengenai sudu dan besarnya *angle of attack*. Kombinasi kecepatan angin *freestream* dan *angle of attack* yang sesuai akan menghasilkan gaya *lift* yang optimal. Nilai gaya lift inilah yang akan menentukan besarnya nilai torsi yang diproduksi. Kemudian pada turbin angin Darrieus empat sudu ini juga terjadi pergeseran nilai maksimum torsi akibat penambahan kecepatan angin *freestream*. Hal ini dapat terlihat pada saat kecepatan *freestream* 7 m/s – 15 m/s nilai maksimum torsi bergeser dari 85° menjadi 90° hingga 95° , dan pada daerah *downstream* saat kecepatan *freestream* 11 m/s hingga 15 m/s nilai torsi maksimum bergeser dari sudut putar 195° menjadi 200° hingga 210° .



Gambar 4.15. Grafik torsi terhadap sudut putar sudu 1 pada turbin angin Darrieus empat sudu dengan variasi kecepatan *freestream*

Gambar 4.16.(b) menunjukkan total torsi yang terjadi pada tiap sudut putar turbin angin Darrieus tiga sudu. Pada gambar 4.16 dapat dilihat bahwa grafik torsi mengalami penurunan pada sudut putar 0° - 30° , kemudian meningkat seiring dengan meningkatnya sudut putar mulai 30° - 90° . Nilai torsi total maksimum pada sudut putar 85° - 90° untuk masing-masing kecepatan angin *freestream*. Setelah itu pada sudut putar 90° - 150° kembali mengalami penurunan nilai. Siklus ini terus berulang setiap 120° hingga satu





Gambar 4.16.(a) Grafik torsi terhadap sudut putar sudu 1, 2, 3 pada turbin angin Darrieus tiga sudu pada kecepatan *freestream* 15 m/s, (b) Grafik torsi total terhadap sudut putar turbin angin Darrieus tiga sudu dengan variasi kecepatan *freestream*, (c) Kontur tekanan + *freestream* turbin angin Darrieus tiga sudu $\theta = 205^\circ$, (d) Kontur tekanan + *freestream* turbin angin Darrieus tiga sudu $\theta = 270^\circ$

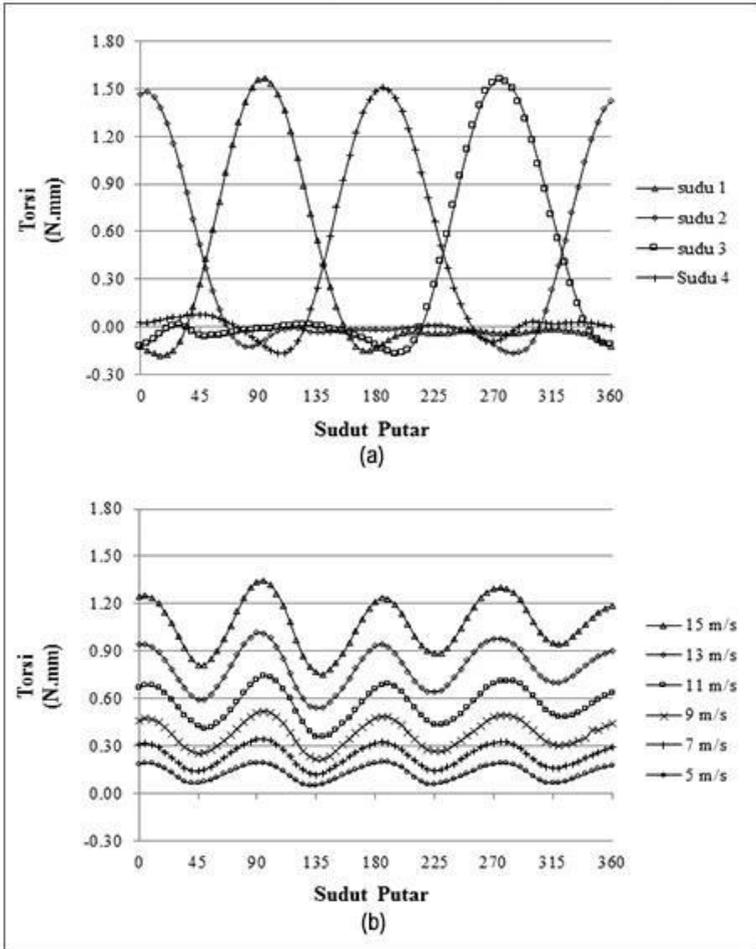
putaran penuh tercapai. Saat sudut putar turbin angin 0° , turbin tetap mampu menghasilkan torsi dengan nilai yang baik dikarenakan sudu 2 menghasilkan nilai torsi yang cukup besar pada kondisi ini, meskipun torsi sudu 1 dan sudu 3 bernilai minus karena tidak memiliki gaya *lift* dan berada pada daerah *downstream* seperti ditunjukkan pada gambar 4.16.(a). Torsi total maksimum turbin angin Darrieus pada kecepatan *freestream* 15 m/s terjadi saat turbin berputar hingga 205° dengan nilai 2,564 N.mm. Hal ini terjadi

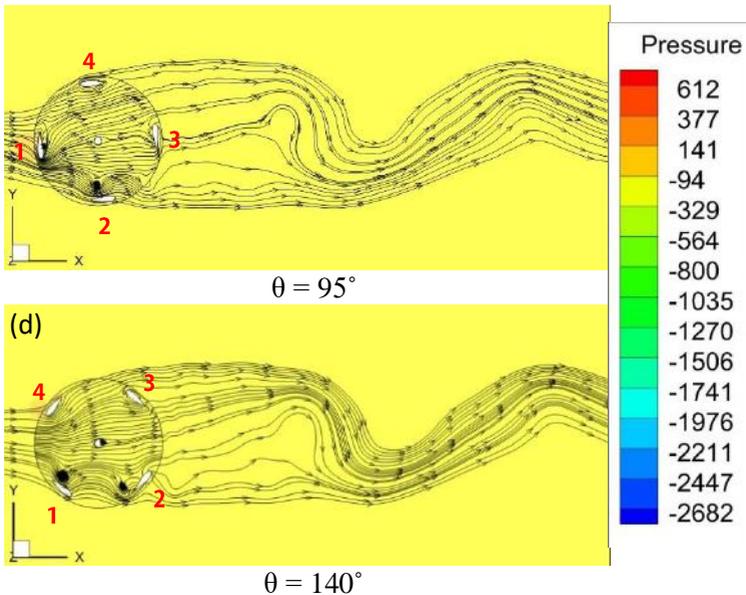
karena sudu 3 menghasilkan torsi yang cukup besar, dengan ditunjang oleh nilai sudu 1 yang cukup baik karena ada *vortex* yang sangat dekat dengan sudu 1 sehingga aliran yang mengalir antara *vortex* dan sudu 1 melesat cepat dan memberikan perbedaan tekanan yang cukup baik pada sudu 1, seperti pada gambar 4.16.(c). Sedangkan pada sudut putar 270° nilai total torsi sangat rendah dikarenakan adanya penurunan nilai torsi yang drastis pada sudu 3 dan tidak ada efek yang berarti dari *vortex* yang terbentuk karena jaraknya dengan sudu 3 yang terlampau jauh, serta tidak ada peningkatan torsi yang signifikan pada sudu 1 karena aliran yang mengenainya terhalang oleh poros, seperti terlihat pada gambar 4.16.(d).

Gambar 4.17.(b) menunjukkan torsi total yang terjadi pada tiap sudut putar turbin angin Darrieus empat sudu. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa grafik torsi mengalami penurunan pada sudut putar 0° - 45° , kemudian meningkat seiring dengan meningkatnya sudut putar mulai 45° - 90° pada masing-masing kecepatan angin *freestream*. Siklus ini akan terus berulang setiap 90° hingga turbin mencapai putaran penuh 360° . Sama seperti pada turbin angin Darrieus tiga sudu, meskipun ada beberapa sudu yang memiliki nilai torsi kecil atau minus, turbin tetap mampu menghasilkan torsi total dengan nilai yang baik. Hal ini dikarenakan ada sudu lainnya yang berkontribusi memberikan nilai torsi yang lebih tinggi (biasanya sudu ini berada di daerah *upstream*) seperti tampak pada gambar 4.17.(a). Nilai torsi total maksimum pada turbin angin Darrieus empat sudu kecepatan *freestream* 15 m/s tercapai saat turbin angin menempuh sudut putar 95° dengan nilai torsinya 1.344 N.mm. Nilai torsi ini adalah hasil gabungan dari torsi keempat sudu turbin angin ini, dengan sudu 1 yang berada di daerah *upstream* menghasilkan nilai torsi tertinggi daripada ketiga sudu lainnya yang hanya menghasilkan nilai torsi cukup rendah.

Turbin angin Darrieus tiga sudu memiliki nilai torsi yang lebih baik dibanding turbin angin Darrieus empat sudu. Pada grafik 4.18 terlihat bahwa nilai torsi total maksimal turbin angin Darrieus tiga sudu pada kecepatan *freestream* 15 m/s lebih tinggi hingga

mencapai kisaran 91% daripada nilai torsi total maksimal turbin angin Darrieus empat sudu. Hal ini terjadi karena semakin banyak sudu yang digunakan pada turbin angin Darrieus ini, maka semakin banyak pula sudu “penghambat” dengan nilai torsi kecil atau minus yang akan mengurangi nilai torsi total yang diperoleh. Meskipun begitu, profil grafik torsi total pada turbin angin Darrieus empat sudu lebih stabil, karena fluktuasi pada grafik torsi total turbin ini lebih kecil dibandingkan dengan turbin angin Darrieus tiga sudu.



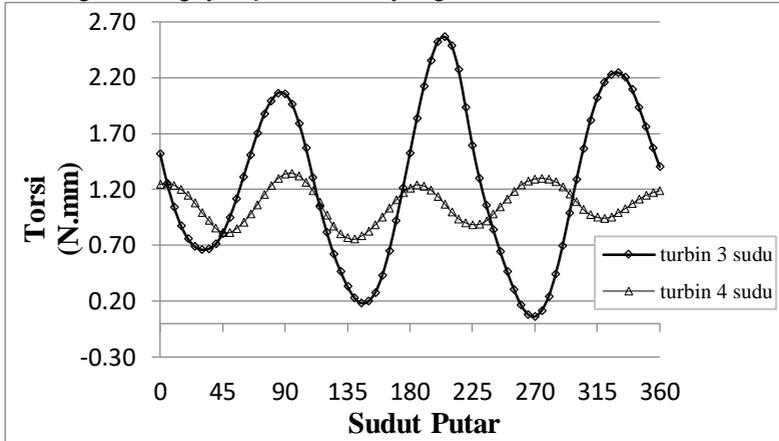


Gambar 4.17.(a) Grafik torsi terhadap sudut putar sudu 1, 2, 3, 4 pada turbin angin Darrieus empat sudu pada kecepatan *freestream* 15 m/s, (b) Grafik torsi total terhadap sudut putar turbin angin Darrieus empat sudu dengan variasi kecepatan *freestream*, (c) Kontur tekanan + *freestream* turbin angin Darrieus empat sudu $\theta = 95^\circ$, (d) Kontur tekanan + *freestream* turbin angin Darrieus empat sudu $\theta = 140^\circ$

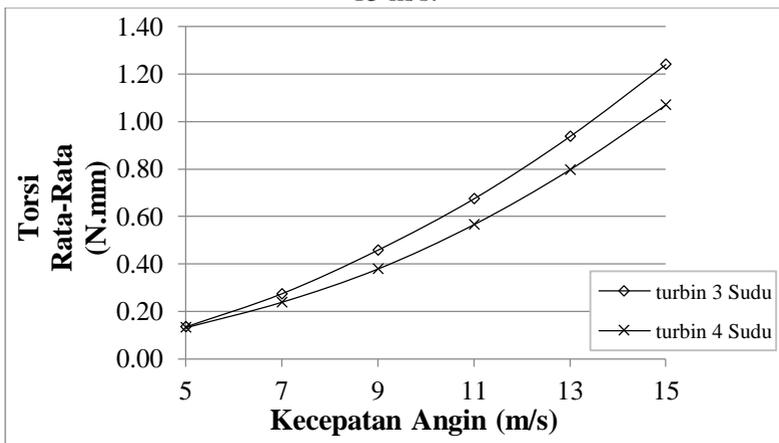
4.4.2. Torsi Rata-rata Pada Tiap Kecepatan Angin

Gambar 4.19 menunjukkan torsi rata-rata yang terjadi pada tiap kecepatan angin turbin angin Darrieus baik tiga sudu maupun empat sudu. Torsi rata-rata ini didapat dengan menjumlahkan torsi total pada tiap sudut putar hingga sudut putar 360° pada kecepatan *freestream* tertentu, kemudian membaginya sebanyak data torsi total yang ada. Kedua grafik torsi rata-rata ini terjadi pada kecepatan 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Dapat dilihat pada gambar 4.19 torsi rata-rata pada turbin angin Darrieus baik tiga sudu maupun empat sudu akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan angin. Pada kecepatan 15 m/s, torsi rata-

rata untuk tiga sudu bernilai 1,24 N.mm dan untuk empat sudu bernilai 1,07 N.mm, memiliki selisih sekitar 15,94 %. Dengan meningkatnya kecepatan angin *freestream*, maka perbedaan tekanan yang terjadi pada tiap sudu pun meningkat, sehingga meningkatkan gaya *lift* dan torsi yang dihasilkan.



Gambar 4.18. Komparasi grafik torsi total turbin angin Darrieus 3 sudu dan 4 sudu terhadap sudut putar pada kecepatan *freestream* 15 m/s.



Gambar 4.19. Grafik torsi terhadap kecepatan angin turbin angin Darrieus tiga sudu dan empat sudu

4.5. KOEFISIEN DAYA

Performa turbin angin Darrieus dapat dilihat dari koefisien daya yang didapatkan dari :

$$C_{power} = \frac{\text{extracted energy}}{\text{wind kinetic energy}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho Av^3} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho Av^3} = C_T \lambda$$

di mana,

P = daya yang dapat diekstrak (Watt)

T = torsi turbin angin Darrieus (N.mm)

ω = putaran turbin angin Darrieus (rad/s)

ρ = massa jenis (kg/mm^3)

A = luas penampang turbin (mm^2)

= Diameter turbin (mm) x tinggi turbin (mm)

v = kecepatan angin *freestream* (mm/s)

C_T = koefisien torsi

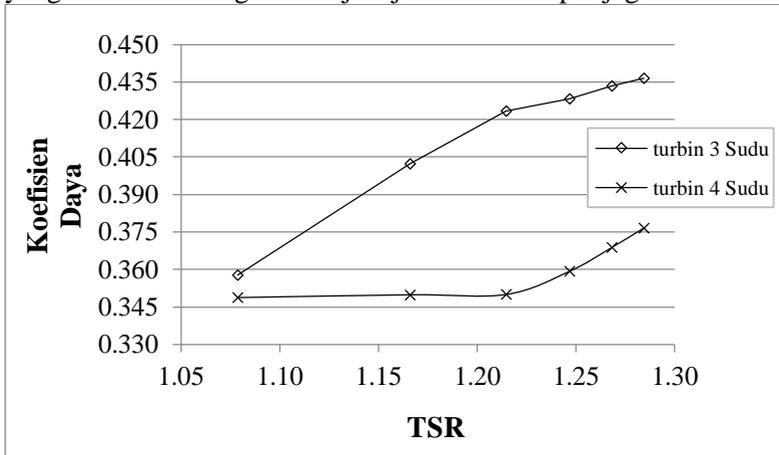
λ = *tip speed ratio* (TSR)

Gambar 4.20 menunjukkan hubungan antara koefisien daya terhadap TSR pada turbin angin Darrieus tiga sudu dan empat sudu. Koefisien daya turbin angin Darrieus tiga sudu mencapai nilai tertinggi yaitu 0,4366 pada TSR 1,28 serta memiliki nilai terendah 0,3577 pada TSR 1,08. Koefisien daya turbin angin Darrieus empat sudu mengalami peningkatan mulai TSR 1,08 yang bernilai 0,3487 hingga TSR 1,28 yang bernilai 0,3766.

Pada rentang TSR 1,08 - 1,28 turbin angin Darrieus tiga sudu memiliki nilai koefisien daya yang lebih tinggi daripada turbin angin Darrieus empat sudu. Hal ini dikarenakan semakin banyak sudu yang digunakan pada turbin angin, maka semakin banyak pula sudu yang berada pada daerah *downstream* yang menghasilkan gaya *drag* tambahan sehingga nilai torsi yang dihasilkan sangat kecil bahkan bernilai minus dan hal ini berpengaruh pula terhadap koefisien daya yang dihasilkan. Koefisien daya maksimal pada turbin angin Darrieus tiga sudu bernilai lebih tinggi sekitar 15,94% dibanding dengan koefisien daya maksimal turbin angin Darrieus empat sudu.

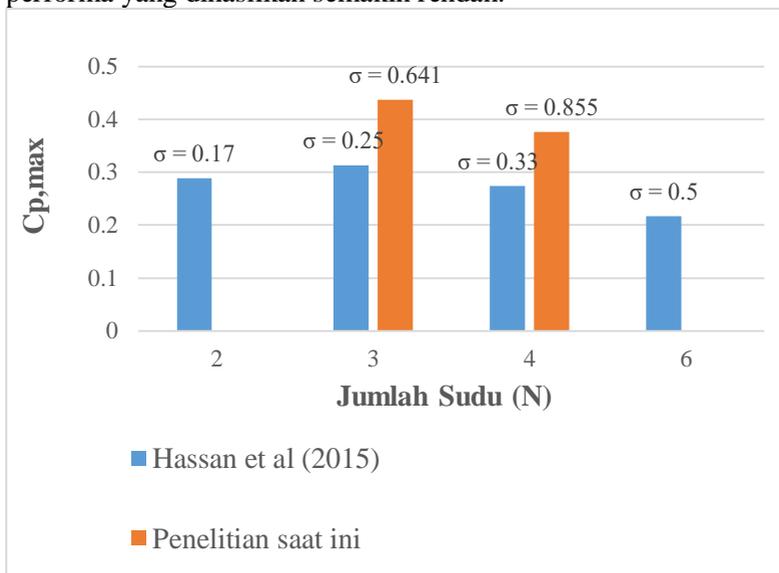
Semakin besar nilai TSR, maka nilai koefisien daya pun akan semakin meningkat. Akan tetapi nilai koefisien daya ini akan

meningkat hingga nilai TSR tertentu, hingga akhirnya nilainya menurun meskipun TSR terus meningkat. Pada penelitian kali ini tidak tampak adanya penurunan koefisien daya pada nilai TSR tertentu dikarenakan rentang nilai TSR yang didapat pada penelitian ini relatif kecil yaitu 1,08 - 1,28 sehingga kurang mampu menangkap fenomena penurunan koefisien daya yang terjadi pada turbin angin dengan karakteristik tertentu. Sedangkan Hassan et al (2015) mampu untuk mendapatkan rentang nilai TSR yang lebih besar, terlihat pada gambar 2.10 dengan rentang nilai TSR sekitar 1,5 - 4,5 sehingga dengan rentang TSR tersebut mampu menangkap fenomena kenaikan dan penurunan nilai koefisien daya turbin angin pada nilai TSR tertentu. Perbedaan rentang TSR ini terjadi karena pada penelitian Hassan et al (2015) variabel yang berpengaruh pada nilai TSR nya adalah nilai ω (putaran turbin) saja dengan nilai kecepatan *freestream* dan jari-jari turbin konstan pada setiap simulasi, sedangkan pada penelitian ini variabel yang berpengaruh pada nilai TSR adalah kecepatan *freestream* dan ω yang bervariasi dengan nilai jari-jari turbin tetap dijaga konstan.



Gambar 4.20. Grafik koefisien daya terhadap TSR turbin angin Darrieus tiga sudu dan empat sudu

Pada penelitian ini ada ketidaksesuaian nilai koefisien daya yang didapat dengan penelitian Hassan et al (2015) sebelumnya. Pada gambar 4.21 terlihat bahwa nilai $C_{p,max}$ pada penelitian saat ini lebih tinggi daripada $C_{p,max}$ penelitian Hassan et al (2015) dengan nilai *solidity* (σ) yang lebih tinggi pula. Seharusnya nilai koefisien daya yang didapat pada penelitian kali ini (turbin angin Darrieus tiga sudu dan empat sudu) bernilai lebih rendah daripada koefisien daya yang didapat pada penelitian Hassan et al (2015) dikarenakan semakin tinggi nilai *solidity* maka performa yang dihasilkan semakin rendah.



Gambar 4.21. Komparasi nilai $C_{p,max}$ pada penelitian Hassan et al (2015) dengan penelitian saat ini

Ketidaksesuaian ini dapat terjadi karena metode *meshing* yang digunakan pada penelitian saat ini adalah *automated mesh* atau *unstructured mesh*, sehingga memungkinkan data yang dihasilkan tidak sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan model *meshing* yang lebih rapi. Hal lain yang mungkin menyebabkan ketidaksesuaian ini adalah panjang *chord* yang digunakan berbeda, sehingga nilai *solidity* yang dihasilkan

pun bisa berbeda. Akan tetapi nilai $C_{p,max}$ turbin angin Darrieus tiga sudu lebih tinggi daripada $C_{p,max}$ turbin angin Darrieus empat sudu, sesuai dengan penelitian terdahulu.

BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Pada simulasi turbin angin Darrieus dengan variasi jumlah sudu (3 & 4 sudu) dan kecepatan angin 5, 7, 9, 11, 13 dan 15 m/s dapat diambil kesimpulan bahwa:

- 1) Nilai torsi yang dihasilkan dipengaruhi oleh penambahan kecepatan angin dan penambahan jumlah sudu. Semakin tinggi kecepatan angin, maka semakin tinggi pula torsi yang dihasilkan. Akan tetapi semakin banyak jumlah sudu yang digunakan, maka nilai torsi yang dihasilkan semakin rendah. Pada penelitian ini torsi rata-rata maksimum dicapai pada kecepatan angin 15 m/s dengan nilai torsinya adalah 1,24 N.mm untuk turbin angin Darrieus tiga sudu dan 1,07 N.mm untuk turbin angin Darrieus empat sudu. Hal ini terjadi karena semakin banyak sudu yang digunakan maka semakin banyak pula jumlah sudu yang berada di daerah *downstream* yang akan menghasilkan torsi bernilai rendah bahkan minus (dikarenakan nilai gaya *lift* yang kecil) sehingga menghambat putaran turbin dan memperkecil nilai torsi total yang dihasilkan.
- 2) Nilai torsi yang dihasilkan oleh suatu sudu dipengaruhi oleh kontur tekanan yang terjadi. Semakin tinggi perbedaan tekanan yang terjadi pada suatu sudu, maka semakin besar pula gaya *lift* yang dihasilkan oleh sudu tersebut dan nilai resultan dari gaya *lift* dan gaya *drag* akan bertambah. Pertambahan nilai Resultan gaya ini berbanding lurus dengan pertambahan nilai torsi.
- 3) Semakin besar gaya *lift* yang dihasilkan pada suatu sudu, maka semakin tinggi pula kecepatan pada sudu tersebut.
- 4) Torsi yang dihasilkan oleh sudu-sudu pada daerah *upstream* lebih tinggi daripada torsi yang dihasilkan pada daerah *downstream*. Hal ini disebabkan karena sudu-sudu di daerah *upstream* berhadapan langsung dengan aliran

freestream dengan kecepatan maksimumnya saat melalui inlet, yang berakibat pada tingginya perbedaan tekanan yang terjadi pada sudu-sudu tersebut sehingga torsi yang dihasilkan pun tinggi. Sedangkan aliran *freestream* pada daerah *downstream* telah kehilangan banyak kecepatannya akibat berhadapan dengan sudu-sudu di daerah *upstream*, sehingga perbedaan tekanan yang terjadi pun lebih kecil dan begitupula dengan torsi yang dihasilkan.

- 5) Koefisien daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai torsi yang terjadi. Semakin tinggi nilai torsi maka koefisien daya yang dihasilkan pun akan semakin baik. Hal ini terbukti pada rentang TSR 1,08 – 1,28 nilai koefisien daya maksimal turbin angin Darrieus tiga sudu lebih tinggi sekitar 15,94% (dengan nilai koefisien daya maksimal sebesar 0,4366) dibandingkan dengan turbin angin Darrieus empat sudu (dengan nilai koefisien daya maksimal sebesar 0,3766), dimana nilai torsi rata-rata maksimal turbin angin darrieus tiga sudu lebih tinggi daripada turbin angin Darrieus empat sudu.
- 6) Kontur aliran dan tekanan serta nilai torsi dan koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin angin dipengaruhi oleh jumlah *cell* dan tipe *mesh* yang digunakan.

5.2 REKOMENDASI

Adapun beberapa rekomendasi yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu:

- 1) Diperlukan studi lebih lanjut untuk menggunakan model aliran turbulen pada simulasi turbin angin Darrieus seperti *standard k-epsilon two layer*, *k-omega*, *Spalart Almaras* dan model aliran lainnya.
- 2) Diperlukan studi lebih lanjut untuk menggunakan model *mesh* lainnya seperti *polyhedral mesh*, *trimmed cell mesher* dan *overset mesh* dengan jumlah *cell* yang lebih banyak ataupun lebih sedikit daripada yang digunakan pada simulasi ini.

- 3) Diperlukan studi lebih lanjut untuk menggunakan profil *airfoil* sudu lainnya dengan variasi *angle of attack* yang berbeda.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

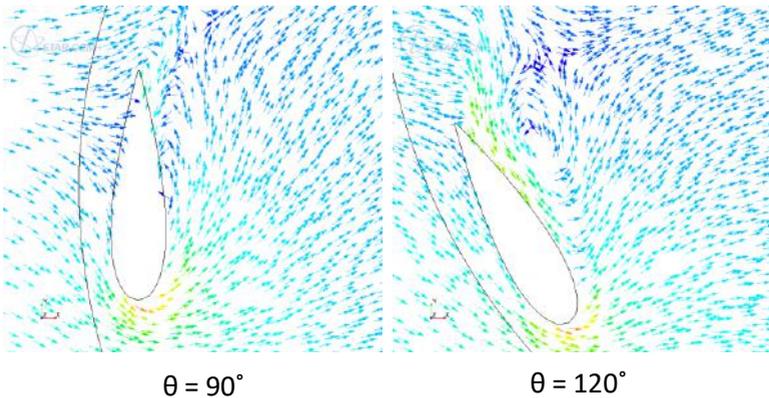
DAFTAR PUSTAKA

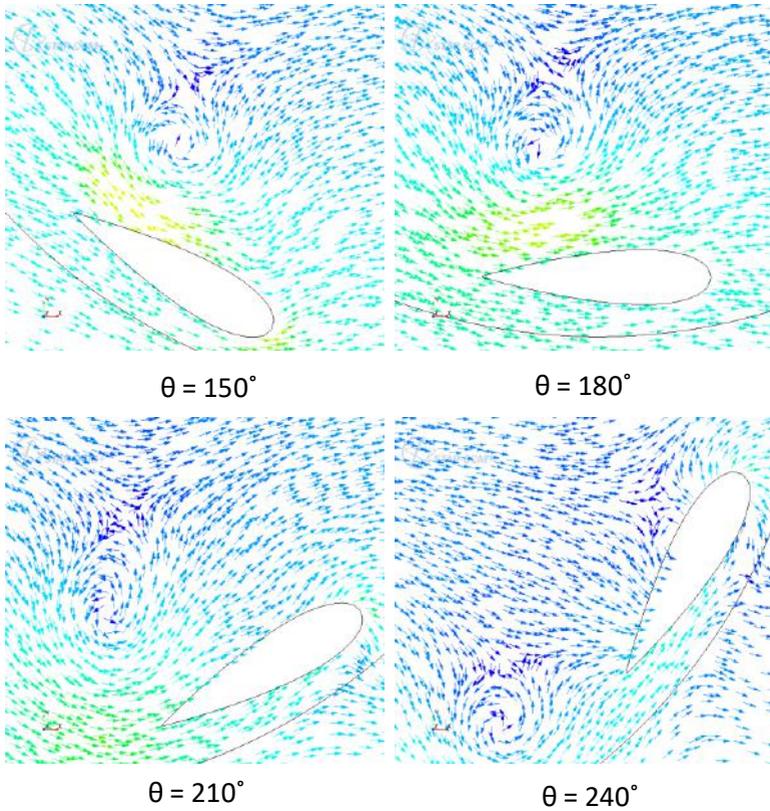
- Almohammadi, K.M., D.B. Ingham, L. Ma & M. Pourkashanian. 2015. “Modelling dynamic stall of a straight blade vertical axis wind turbine”. **Journal of Fluids and Structures** 57, 144 – 158.
- Arsad, Agus Muhammad, & Firman Hartono. **PEMBUATAN KODE DESAIN DAN ANALISIS TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL DARRIEUS TIPE-H**, <URL: http://www.academia.edu/15648801/PEMBUATAN_KODE_DESAIN_DAN_ANALISIS_TURBIN_ANGIN_SUMBU_VERTIKAL_DARRIEUS_TIPE-H>.
- Brusca, S., R. Lanzafame & M. Messina. 2014. “Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine’s performance”. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, 5:333 – 340.
- Dwiyantoro, B.A., Vivien Suphandani & Rahman. 2015. “Studi Eksperimental tentang Karakteristik Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Darrieus-Savonius”. **Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV)**.
- Gorle, J.M.R., L. Chatellier, F. Pons & M. Ba. 2016. “Flow and performance analysis of H-Darrieus hydroturbine in a confined flow: A computational and experimental study”. **Journal of Fluids and Structures** 66, 382 – 402.
- Hassan, Islam M., Ahmad M. Ali, Mahdi S. Al-Ajmi & Taher G. Abu El-Yazied. 2015. “Effect of Number of Blades and Blade Chord Length on the Performance of Darrieus Wind Turbine”. **American Journal of Mechanical Engineering and Automation** 2, 1:16 – 25.

- Nugroho, Fadjar. 2008. **Bab 3a Aerodinamika Penerbangan**, <URL:<http://www.ilmuterbang.com/artikel-mainmenu-29/teori-penerbangan-mainmenu-68/151-bab-3a-aerodinamika-penerbangan?showall=1>>.
- Nugroho, Fadjar. 2011. **Apa artinya Wake Turbulence**, <URL:<http://www.ilmuterbang.com/artikel-mainmenu-29/teori-penerbangan-mainmenu-68/517-apa-artinya-wake-turbulence>>.
- Rossander, Morgan, et al. 2015. “Evaluation of a Blade Force Measurement System for a Vertical Axis Wind Turbine Using Load Cells”. **Energies** 8 (2015), 5973 – 5996.
- Singh, M.A., A. Biswas & R.D. Misra. 2015. “Investigation of self-starting and high rotor solidity on the performance of a three S1210 blade H-type Darrieus rotor”. **Renewable Energy: AN INTERNATIONAL JOURNAL** 76, 381 – 387.
- Sudargana, & R. Guruh Kis Yuniarso. 2012. “ANALISA PERANCANGAN TURBIN DARRIEUS PADA HYDROFOIL NACA 0015 DARI KARAKTERISTIK C_L DAN C_D PADA VARIASI SUDUT SERANG MENGGUNAKAN REGRESI LINIER PADA MATLAB”. **Jurnal Teknik Mesin ROTASI** 14, 21 – 28.
- Taylor, Derek. **Renewable Energy: POWER FOR A SUSTAINABLE FUTURE**, <URL:<http://www.colorado.edu/MCEN/SustainableEnergy/Documents/ReadingAssignments/Week11/windchapterrenewableenergytext.pdf>>.
- Voneschen, Manuel Franquesa. 2010. **Brief introduction to the Darrieus wind turbines**, <URL:http://amics21.com/laveritat/introduction_darrieus_wind_turbines.pdf>.

LAMPIRAN

Penampilan vektor kecepatan pada turbin angin Darrieus empat sudu pada sudut putar yang muncul *vortex* dibawah ini mirip pada turbin angin Darrieus tiga sudu. Akan tetapi *vortex* pada turbin angin Darrieus mendekati kembali pada bagian dalam sudu pada sekitar sudut putar 240° (setelah terbentuk sejak sudut putar 90°) sehingga mengakibatkan torsi pada sudut putar sekitar 240° menjadi turun hingga bernilai minus, sedangkan *vortex* pada turbin angin Darrieus empat sudu hanya sedikit mendekati ke bagian dalam sudu pada sudut putar sekitar $210^\circ - 230^\circ$ dan langsung menjauhi sudu sehingga tidak terlalu menurunkan nilai torsi pada daerah ini. Penampilan vektor kecepatan turbin angin Darrieus empat sudu ini dapat dilihat pada gambar 1.





Gambar 1. Vektor kecepatan yang menunjukkan kemunculan *vortex* pada beberapa sudut putar sudu 1 turbin angin Darrieus empat sudu pada kecepatan *freestream* 15 m/s

TENTANG PENULIS



Rahmat Taufiqurrahman, lahir di Kabupaten Pamekasan 24 Mei 1992. Anak pertama dari Endang Sri Hastuti dan Achmad Mudaffar. Penulis mulai menuntut ilmu dari jenjang TK Nahdlatul Ulama (1996-1998), lalu melanjutkan ke SD Negeri Barurambat Kota 1 Pamekasan (1998-2004), kemudian melanjutkan ke SMP Negeri 1 Pamekasan (2004-2007), dan SMA Negeri 1 Pamekasan (2007-2010). Pada tahun 2010 penulis melanjutkan studi Strata 1 di Teknik Mesin FTI ITS dengan NRP 2110100131. Di jurusan Teknik Mesin ini penulis mengambil bidang studi Konversi Energi. Ketika menimba ilmu di perkuliahan, penulis mengikuti organisasi Forum Komunikasi Mahasiswa Pamekasan (FORKAMP), dimulai dari semester 1 dan 2 perkuliahan sebagai anggota. Kemudian menjadi staff ahli yang berperan aktif dalam keberlangsungan organisasi. Pada tahun 2012, penulis menjadi konseptor acara sekaligus ketua sub acara Robosoccer yang merupakan salah satu rangkaian acara dari MAROCO (Madura Robot Contest) yang diadakan sejak tahun 2010 bertempat di Pamekasan. Selain itu penulis juga menjadi Panitia Try-Out Seleksi Masuk Perguruan Tinggi Negeri di Indonesia yang diselenggarakan Se-Madura tahun 2011 & 2012. Selain kegiatan perkuliahan, penulis juga berperan aktif baik sebagai panitia maupun peserta di beberapa acara kampus, pelatihan pengembangan diri, pelatihan *software engineering*, dan kegiatan luar kampus. Penulis juga menjadi salah satu *owner* dan pengembang wirausaha yang bergerak di bidang *service &* jual beli laptop (ANTSHOP) kurang lebih selama 3,5 tahun terhitung sejak

tahun 2013. Penulis dapat dihubungi melalui : 0852 3003 5045 & os.taufiq@gmail.com.