

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Angin

Angin adalah udara yang bergerak dari tekanan udara yang lebih tinggi ke tekanan udara yang lebih rendah. Perbedaan tekanan udara disebabkan oleh perbedaan suhu udara akibat pemanasan atmosfer yang tidak merata oleh sinar matahari. Pergerakan angin memiliki energi kinetik, sehingga energi kinetik yang dihasilkan oleh angin dapat dikonversi atau ditransfer ke dalam bentuk energi lain seperti listrik atau mekanik dengan menggunakan kincir atau turbin angin dengan mengubah rotasi dari rotor turbin menjadi arus listrik dengan menggunakan generator listrik (Daryanto (2007)).

Pemanfaatan energi terbarukan yang saat ini memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah energi angin. Energi ini merupakan energi yang bersih dan dalam proses produksinya tidak mencemari lingkungan. Perkembangan energi angin di Indonesia untuk saat ini masih tergolong rendah. Salah satu penyebabnya adalah karena kecepatan angin rata-rata di wilayah Indonesia tergolong dalam angin kecepatan rendah, yaitu 3 m/s hingga 5 m/s sehingga sulit untuk menghasilkan energi listrik dalam skala besar. Meskipun demikian, potensi angin di Indonesia tersedia hampir sepanjang tahun, sehingga memungkinkan untuk dikembangkannya sistem pembangkit listrik skala kecil. Salah satu bentuk kincir angin yang relatif mudah dibuat adalah kincir angin dengan sumbu vertikal. Kincir angin jenis ini berputar dengan memanfaatkan kecepatan angin dari berbagai arah dan mudah dikonversi untuk membangkitkan energi listrik (Nakhoda, 2015).

2.2 Turbin Angin

Turbin angin adalah alat yang dapat mengkonversi energi kinetik pada angin menjadi energi listrik. Energi kinetik pada angin disalurkan melalui rotor, *drivetrain*, dan dikonversi oleh generator. Awalnya turbin angin dimanfaatkan untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dan lainnya. Turbin angin terdahulu banyak digunakan di

Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan *windmill* (Natayuda, 2017). www.itk.ac.id

Desain dari kincir/turbin angin sangat banyak macam jenisnya, berdasarkan bentuk rotor, kincir angin dibagi menjadi dua tipe, yaitu turbin angin sumbu horizontal (*horizontal axis wind turbine*) dan turbin angin sumbu vertikal (*vertical axis wind turbine*) (Nakhoda, 2015).

2.2.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) merupakan turbin yang poros utamanya berputar menyesuaikan arah angin. Agar rotor dapat berputar dengan baik, arah angin harus sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap arah putar rotor. Biasanya turbin jenis ini memiliki sudu (*blade*) berbentuk *airfoil* seperti bentuk sayap pada pesawat. Secara umum semakin banyak jumlah sudu (*blade*), semakin tinggi putaran turbin (Nakhoda, 2015). Gambar 2.1 berikut menunjukkan bentuk turbin angin sumbu horizontal.

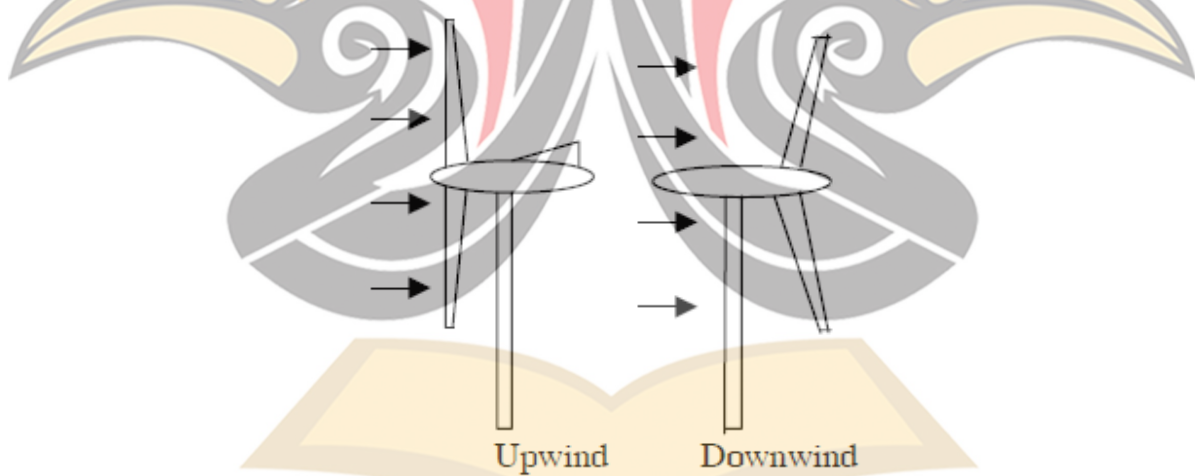


Gambar 2.1 Turbin angin sumbu horizontal (Mathew, 2006)

Cara kerjanya cukup sederhana, energi angin yang akan memutar turbin angin, diteruskan untuk memutar rotor pada generator dibelakang bagian turbin angin, sehingga akan menghasilkan energi listrik. Energi listrik ini biasanya akan disimpan dahulu ke dalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan. Turbin Angin

Sumbu Horizontal (TASH) memiliki poros utama dan generator listrik yang berada di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang dihubungkan ke sebuah motor servo. Sebagian besar memiliki sebuah *gearbox* yang mengubah putaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar, karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya. Turbin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara, karena turbulensi dapat menyebabkan kerusakan struktur menara dan keandalan (*realibilitas*) dari alat begitu penting (Putranto dkk, 2017).

Sebagian besar TASH merupakan mesin *upwind* (melawan arah angin). Meski memiliki permasalahan turbulensi, mesin *downwind* (menurut arah angin) dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar mereka tetap searah dengan angin disaat angin berhembus sangat kencang, bilah-bilahnya bisa ditekuk sehingga mengurangi wilayah tiupan mereka dan dengan demikian juga mengurangi resistensi angin dari bilah-bilah itu (Putranto dkk, 2017). Gambar 2.2 berikut merupakan bentuk turbin angin horizontal tipe *upwind* dan *downwind*.



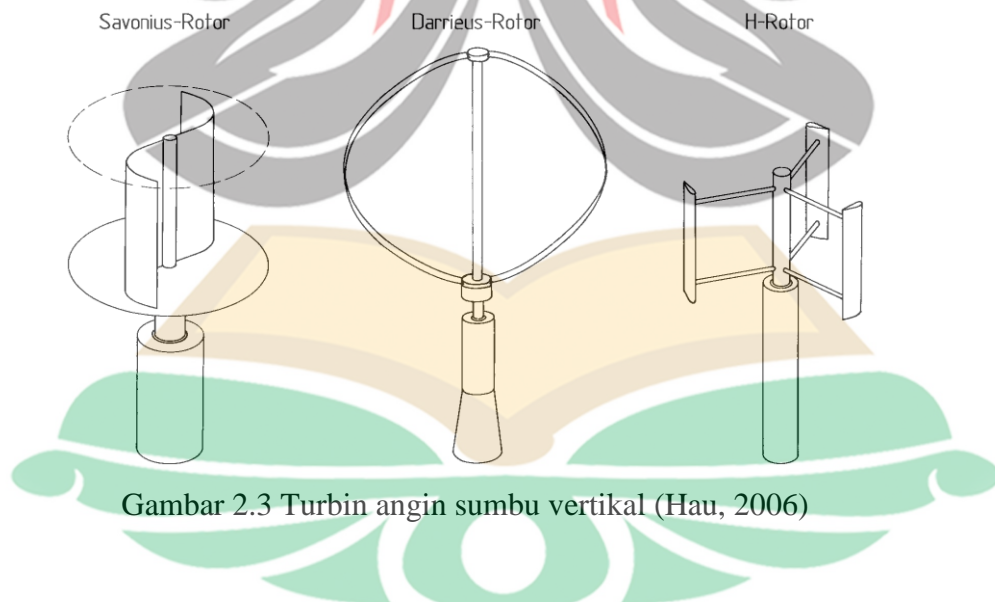
Gambar 2.2 Turbin angin horizontal tipe *Upwind* dan *Downwind* (Mathew, 2006)

Setiap desain rotor mempunyai kelebihan dan kekurangan. Kelebihan turbin jenis ini, yaitu memiliki efisiensi yang tinggi. Kekurangannya, yaitu turbin jenis ini memiliki desain yang lebih rumit karena rotor hanya dapat menangkap angin dari satu arah sehingga dibutuhkan pengarah angin (Nahkoda, 2015).

2.2.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) merupakan turbin angin sumbu tegak yang gerakan poros dan rotor sejajar dengan arah angin, sehingga rotor dapat berputar pada semua arah angin. Turbin angin jenis ini memiliki struktur yang lebih sederhana. Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) adalah turbin angin yang dapat digunakan pada kecepatan angin yang bervariasi dengan arah yang berbeda-beda. Tidak seperti turbin angin sumbu horizontal, turbin angin jenis ini memiliki kecepatan putar yang rendah dengan torsi yang tinggi (Putranto dkk, 2011).

Secara umum TASV terbagi menjadi beberapa jenis berdasarkan bentuk rotor yaitu Savonius, Darrieus, Giromill dan Crossflow. Turbin Savonius merupakan turbin yang memanfaatkan gaya dorong (*drag force*) untuk memutar rotor turbinnya. Turbin Darrieus merupakan turbin yang memanfaatkan gaya angkat (*lift force*) untuk memutar rotor turbinnya, sedangkan turbin Giromill merupakan modifikasi dari Darrieus dimana sudu berbentuk *airfoil*. Turbin Crossflow merupakan turbin angin dengan jumlah rotor yang banyak dengan ukuran yang kecil (Nakhoda, 2013).

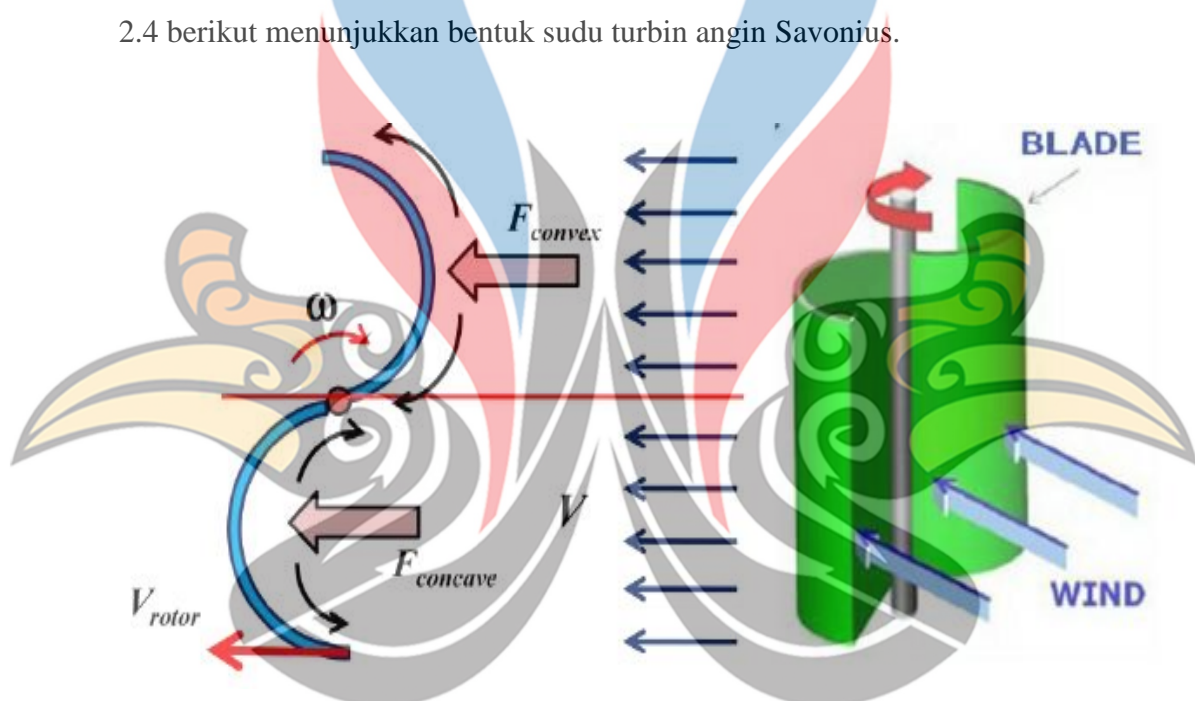


Gambar 2.3 Turbin angin sumbu vertikal (Hau, 2006)

Gambar 2.3 merupakan variasi dari jenis turbin angin vertikal. Dengan menggunakan konstruksi sumbu yang vertikal, komponen seperti *gearbox* dan *generator* dapat ditempatkan di dekat tanah, sehingga lebih mudah ketika dilakukan perbaikan (*maintenance*) (Saad, 2014).

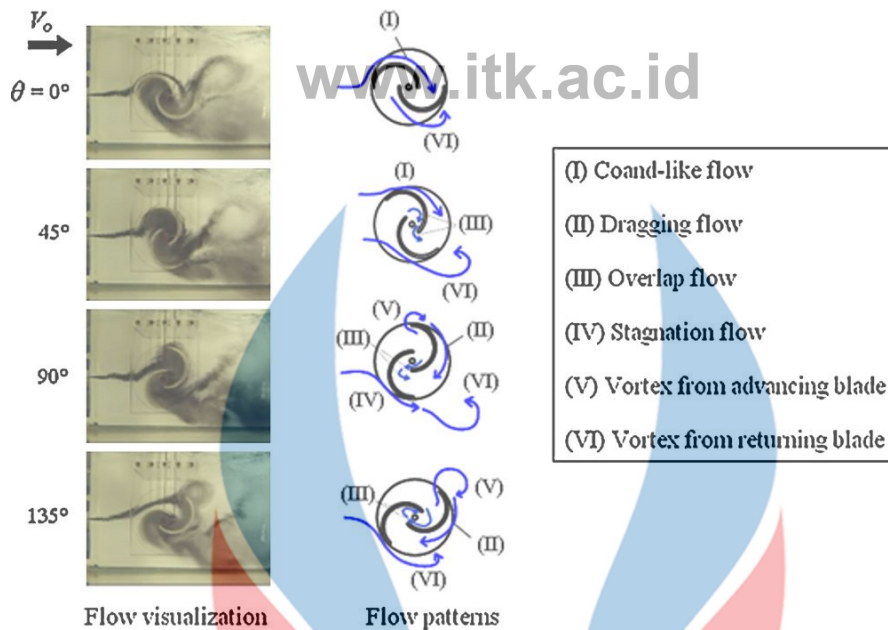
2.3 Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius diperkenalkan pertama kali oleh Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Turbin angin Savonius adalah turbin angin yang memiliki bentuk dan konstruksi yang sangat sederhana sehingga dalam proses pembuatannya pun tidak memerlukan biaya yang mahal. Turbin angin Savonius adalah salah satu turbin angin yang digerakkan dengan gaya *drag*. Turbin ini terdiri atas dua hingga tiga *bucket* atau sudu yang disusun sedemikian rupa sehingga jika dilihat dari atas akan terlihat seperti membentuk huruf S (Latif, 2013). Gambar 2.4 berikut menunjukkan bentuk sudu turbin angin Savonius.



Gambar 2.4 Sudu turbin angin Savonius (Ali, 2013)

Turbin Savonius bergerak karena adanya perbedaan gaya *drag* antara sudu 1 dengan sudu lainnya. Sudu Savonius sering dinamakan *bucket* berfungsi untuk memanipulasi gaya *drag* akibat angin yang mengalir sehingga dapat dikonversikan menjadi torsi (Teja, 2017). Gambar 2.5 berikut menunjukkan bentuk aliran yang dapat menimbulkan putaran pada turbin Savonius.



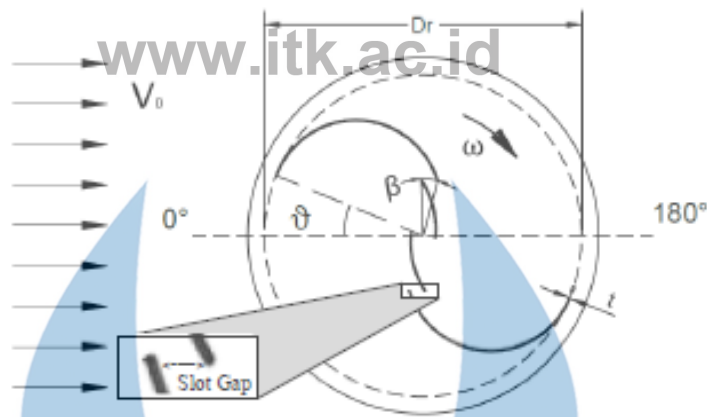
Gambar 2.5 Bentuk aliran yang melintasi suatu rotor Savonius (Akwa, 2012)

Turbin Savonius memiliki koefisien daya yang relatif rendah namun turbin angin Savonius memiliki torsi awal yang tinggi. Turbin ini juga biasanya memiliki TSR yang rendah dan memiliki konstruksi sangat sederhana. Oleh karena itu, turbin Savonius sering digunakan pada aplikasi yang membutuhkan torsi tinggi dengan kecepatan yang rendah (Mathew, 2006).

Turbin angin sumbu vertikal tipe rotor Savonius memiliki beberapa parameter yang berpengaruh terhadap performa turbin angin secara keseluruhan. Secara umum beberapa parameter yang berpengaruh tersebut diantaranya sebagai berikut.

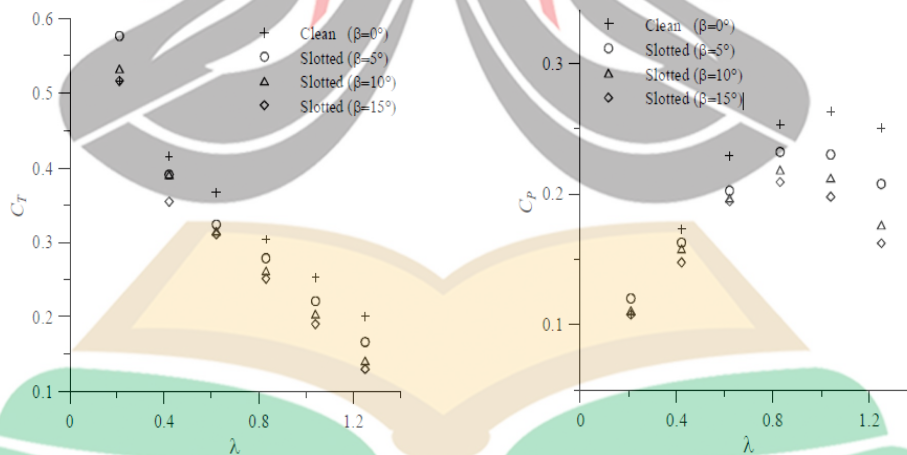
2.3.1 Slot Angle

Performa turbin dengan parameter *slot angle* merupakan konfigurasi turbin angin Savonius baru dengan *bilah slotted* yang meningkatkan efek *bucket* yang tumpang tindih pada kinerja torsi dan daya generator turbin angin. Analisis statis dan dinamis telah dilakukan untuk mengetahui torsi awal dari *blade* berlubang sehubungan dengan sudu standar dan untuk menetapkan pengaruh sudut *slot* yang berbeda β pada koefisien torsi dan daya (Alaimo, dkk, 2012). Gambar 2.6 merupakan penampang *slot angle* pada sudu pada turbin Savonius.



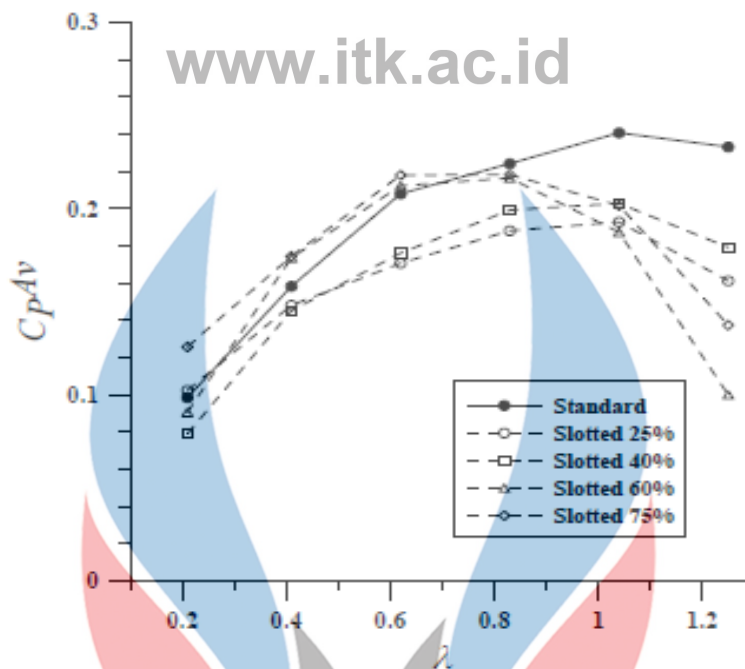
Gambar 2.6 Penampang sudu dengan *slot angle* (β) (Alaimo, dkk, 2012)

Penelitian konfigurasi sudu baru turbin angin tipe Savonius dilakukan dengan variasi *slot angle* pada sudu yang digunakan adalah 5° , 10° dan 15° sudu. Penelitian dilakukan untuk membandingkan daya maksimal turbin dengan variasi jumlah sudu tersebut. Hasil penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.7 grafik perbandingan variasi *slot angle* untuk koefisien torsi (C_T) dan koefisien daya (C_P) terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR) yang dihasilkan turbin angin tipe Savonius (Alaimo, dkk, 2012)



Gambar 2.7 Grafik perbandingan *slot angle* untuk TSR terhadap koefisien torsi (C_T) dan koefisien daya (C_P) (Alaimo, dkk, 2012)

Dihasilkan bahwa kinerja Savonius terkait dengan bilah *slotted* menurun untuk *Tip speed ratio* (TSR) yang tinggi λ jika dibandingkan dengan yang diperoleh untuk konfigurasi standar. Di sisi lain, sudu turbin angin dengan sudut



Gambar 2.9 Grafik perbandingan posisi *slot* untuk TSR terhadap koefisien daya (C_p) (Alaimo, dkk, 2013)

Didapatkan hasil bahwa kinerja torsi awal yang lebih baik dari *blade* yang ditempatkan sehubungan dengan konfigurasi standar untuk posisi *slot* f kurang dari 40%. Selain itu, dalam kondisi dinamis, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa konfigurasi baru ini berperforma lebih baik daripada standar hanya pada kecepatan sudut rendah (Alaimo, dkk, 2013)

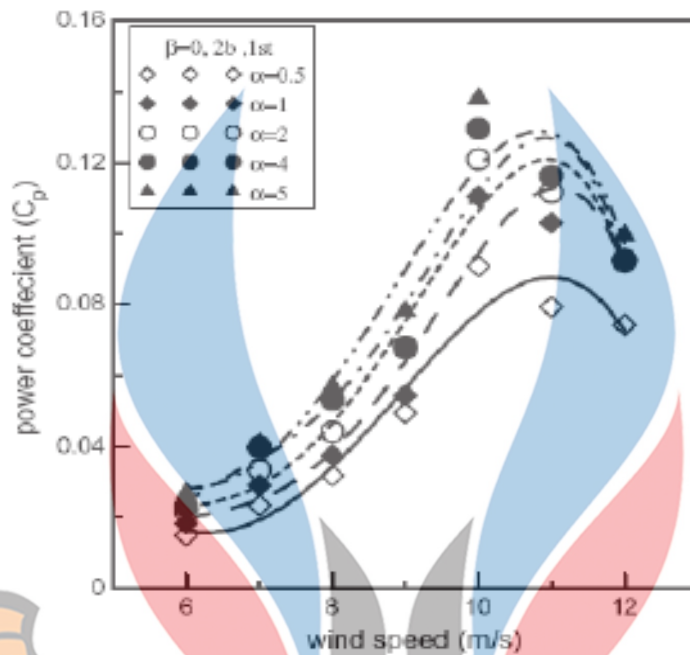
2.3.3 Aspect Ratio

Aspect ratio pada turbin angin Savonius merupakan parameter yang sangat berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin angin. Savonius rotor dengan aspek rasio yang tinggi memiliki kerugian yang lebih rendah karena efek pada ujung dari sudu. Oleh karena itu, meningkatnya nilai aspek rasio pada turbin angin Savonius dapat menambah nilai koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin angin (Akwa, 2012). Persamaan yang digunakan pada *aspect ratio* yaitu :

$$\text{Aspect Ratio } (\alpha) = \frac{\text{Rotor Height } (H)}{\text{Rotor Diameter } (D)} \quad (2.1)$$

Penelitian mendapatkan pengaruh aspek rasio terhadap koefisien daya dengan variasi aspek rasio dari 0,5 sampai 5. Hasil penelitian yang telah dilakukan

seperti pada Gambar 2.10 Grafik perbandingan aspek rasio untuk kecepatan angin terhadap koefisien daya (C_p)



Gambar 2.10 Grafik perbandingan aspek rasio untuk kecepatan angin terhadap koefisien daya (C_p) (Kadam, 2013)

Setelah dilakukan eksperimen pengaruh aspek rasio terhadap koefisien daya dengan variasi aspek rasio dari 0,5 hingga 5 didapatkan bahwa ada peningkatan koefisien daya seiring dengan peningkatan aspek rasio (Kadam, 2013).

2.3.4 Jumlah Sudu

Menurut penelitian Jamal, (2019) dengan judul “Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Savonius” dengan variasi jumlah sudu turbin yaitu 2, 3 dan 4 ditunjukkan pada Gambar 2.11 berikut



Gambar 2. 11 Variasi jumlah sudu turbin angin Savonius (Jamal, 2019)

Hasil penelitian didapatkan bahwa turbin 2 sudu menghasilkan putaran yang lebih besar dibandingkan turbin 3 dan 4 sudu, tetapi turbin 2 sudu memiliki momen torsi yang rendah dibandingkan turbin 3 dan 4 sudu, hal ini terlihat pada rendahnya efisiensi turbin 2 sudu pada kecepatan angin rendah dengan pembebanan tinggi (Jamal, 2019).

2.4 Parameter Performa Turbin Angin

2.4.1 *Tip Speed Ratio* (TSR)

Tip speed ratio (TSR) merupakan rasio kecepatan antara kecepatan angin dengan kecepatan sudu pada turbin. Persamaan untuk mencari nilai TSR terdapat pada Persamaan 2.2 berikut.

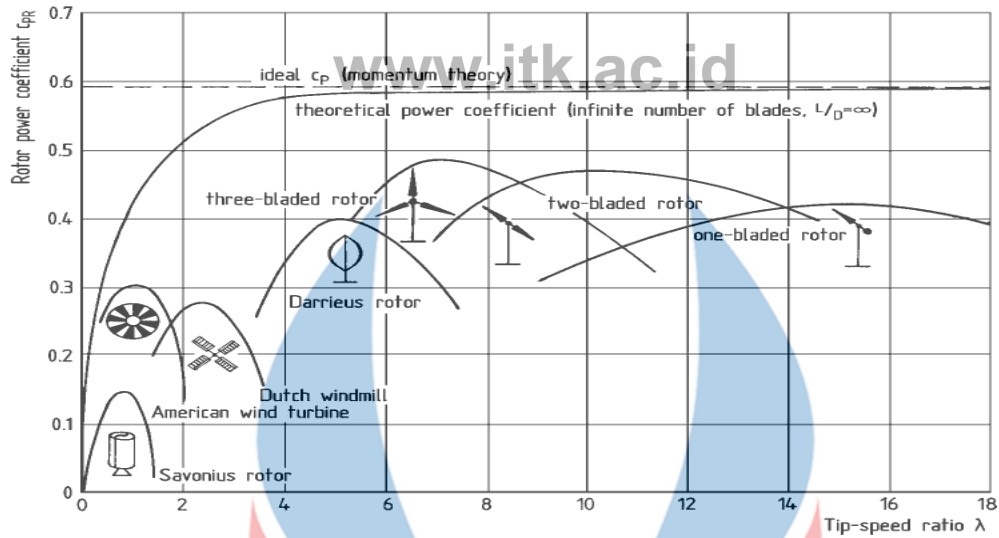
$$\lambda = \frac{2\pi rn}{60v} \quad (2.2)$$

Sehingga dapat disederhanakan menjadi Persamaan 2.3 berikut.

$$\lambda = \frac{\pi rn}{30v} \quad (2.3)$$

Dimana λ adalah *Tip Speed Ratio* (TSR), n adalah putaran poros dalam rpm dan v adalah kecepatan angin dalam satuan m/s (Kurniaji, 2016).

Setiap tipe turbin angin memiliki karakteristik yang berbeda-beda, sehingga TSR akan memengaruhi faktor daya yang dihasilkan. Grafik perbandingan antara TSR dengan koefisien daya (C_p) berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh ilmuwan Jerman bernama Albert Betz untuk berbagai jenis turbin angin ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Nilai TSR dan C_p untuk berbagai jenis turbin angin (Hau, 2006)

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh ilmuwan asal Jerman bernama Albert Betz, didapatkan efisiensi maksimum kincir angin yaitu 59,3% yang selanjutnya disebut *Betz limit*. Nilai C_p maksimum pada grafik *Betz limit* adalah 0,59. Hal ini dikarenakan rotor turbin angin tidak dapat tertutup sempurna saat berputar dan penyebab-penyebab lainnya. Hal ini berdampak pada daya keluaran yang akan didapat. Turbin angin yang di asumsikan adalah turbin angin yang ideal yaitu turbin angin yang tidak mempunyai poros dan mempunyai jumlah sudu yang tak memiliki batas tetapi tidak menimbulkan gaya hambat (*drag force*) pada angin yang melaluinya. (Teja, 2017).

2.4.2 Perhitungan Energi dan Daya Angin

Energi kinetik untuk massa angin m yang bergerak dengan kecepatan v dapat dirumuskan pada Persamaan 2.4.

$$Ek = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.4)$$

Dimana m adalah massa udara yang bergerak dengan satuan kg dan v adalah kecepatan angin dengan satuan m/s. Energi kinetik (Ek) yang terkandung dalam angin ini yang menabrak rotor turbin angin sehingga rotor dapat berputar (Hau, 2006). Dengan menganggap suatu penampang melintang A , dimana udara dengan kecepatan v mengalami laju pemindahan volume untuk setiap satuan waktu, yang

disebut dengan aliran volume (V) yang dinyatakan pada Persamaan 2.5 sebagai berikut.

www.itk.ac.id

$$V = vA \quad (2.5)$$

Dimana v adalah kecepatan angin dalam satuan m/s dan A adalah luas area sapuan rotor dengan satuan m^2 , sehingga nilai V atau laju volume untuk setiap satuan waktu dengan satuan m^3/s dapat diketahui (Hau, 2006). Aliran massa dengan kecepatan udara ρ dirumuskan pada Persamaan 2.6.

$$m = \rho Av \quad (2.6)$$

Selanjutnya untuk mencari nilai daya energi angin dengan mensubstitusikan Persamaan 2.6 ke Persamaan 2.4 sehingga dapat dirumuskan pada Persamaan 2.6 sebagai berikut

$$P_A = \frac{1}{2} \rho Av^3 \quad (2.7)$$

Dimana v sebagai kecepatan angin dengan satuan m/s dan ρ adalah densitas udara dan nilai P_A merupakan daya angin dengan satuan Watt (Hau, 2006).

2.4.3 Perhitungan Daya Listrik

Daya aktual listrik adalah daya yang dihasilkan dari generator. Gaya gerak listrik (GGL) yang dihasilkan oleh generator akan menghasilkan tegangan dan kuat arus listrik. Perkalian antara keduanya akan menghasilkan daya aktual listrik yang ditunjukkan pada Persamaan 2.8.

$$P_g = V_{out} I_{out} \quad (2.8)$$

Nilai P_g adalah daya keluaran generator atau daya aktual listrik dalam satuan watt, V_{out} adalah tegangan listrik dalam satuan volt dan I_{out} adalah arus listrik dalam satuan ampere (Wiranto, 2016).

2.4.4 Koefisien Daya (CP)

Koefisien daya (C_p) merupakan perbandingan daya keluaran dan masukan pada turbin angin, persamaan untuk memperoleh nilai koefisien daya adalah sebagai berikut. Perhitungan untuk C_p ditunjukkan pada Persamaan 2.9.

www.itk.ac.id

$$C_p = \frac{P_g}{P_A} \quad (2.9)$$

Dimana P_g adalah daya listrik keluaran generator dalam satuan Watt dan P_A adalah daya energi angin dalam satuan Watt (Natayuda, 2017).

2.4.5 Koefisien Torsi (CT)

Koefisien torsi dapat diperoleh dari hubungan antara C_P , C_T dan TSR dengan Persamaan 2.10 sebagai berikut (Teja 2017).

$$C_P = \lambda \cdot C_T \quad (2.10)$$

Sehingga didapatkan Persamaan 2.11 sebagai berikut

$$C_T = \frac{C_P}{\lambda} \quad (2.11)$$

Dimana λ merupakan *Tip speed ratio* dan C_P merupakan koefisien daya.

2.5 Penelitian Terdahulu

Pelaksanaan Penelitian diperlukan pengkajian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya agar dapat dijadikan referensi. Data penelitian-penelitian sebelumnya dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan variabel maupun menggunakan data hasil penelitian sebelumnya untuk dioptimalkan. Penelitian terdahulu yang dapat dijadikan referensi dalam rancang bangun turbin angin sumbu vertikal ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu

No	Nama dan Tahun Publikasi	Judul	Hasil
1.	A. Alaimo, dkk (2012).	<i>On the effect of Slotted Blades on Savonius wind generator performances by CFD analysis</i>	Dihasilkan bahwa kinerja Savonius dengan sudu <i>slotted</i> menurun untuk <i>Tip speed ratio</i> yang tinggi jika dibandingkan dengan yang diperoleh untuk konfigurasi standar. Di sisi lain, dengan sudut <i>slot</i> yang kecil, menghasilkan kinerja aerodinamik yang lebih baik untuk <i>Tip speed</i>

ratio yang rendah. Hasil ini dapat dianggap representatif untuk meningkatkan kinerja torsi awal yang diperoleh dengan menggunakan sudu dengan *slotted*.

2. A. Alaimo, dkk (2013). *Slotted Blades Savonius Wind Turbine Analysis by CFD*

Didapatkan hasil bahwa kinerja torsi awal yang lebih baik dari *blade* yang ditempatkan sehubungan dengan konfigurasi standar untuk posisi *slot* f kurang dari 40%. Selain itu, dalam kondisi dinamis, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa konfigurasi baru ini berperforma lebih baik daripada Standar hanya pada kecepatan sudut rendah.

3. A. A. Kadam, S.S. Patil (2013). *A Review Study on Savonius Wind Rotors for Accessing the Power Performance*

Setelah dilakukan eksperimen pengaruh *aspect ratio* terhadap koefisien daya dengan variasi *aspect ratio* dari 0,5 hingga 5 didapatkan bahwa ada peningkatan koefisien daya seiring dengan peningkatan *aspect ratio*.

4. Jamal (2019). *Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Savonius*

Turbin 2 sudu menghasilkan putaran yang lebih besar dibandingkan turbin 3 dan 4 sudu, tetapi turbin 2 sudu memiliki momen torsi yang rendah dibandingkan turbin 3 dan 4 sudu. Pada kecepatan angin 3,5 m/s turbin 2 sudu memiliki efisiensi yang cenderung sama dengan turbin 3 dan 4 sudu, turbin 2 sudu memiliki

efisiensi yang lebih rendah, sedangkan pada kecepatan angin 4,5 – 6,5 m/s turbin 2 sudu memiliki efisiensi yang lebih besar dari turbin 3 dan 4 sudu, tetapi jika beban ditambah maka efisiensi turbin 2 sudu dapat lebih kecil dari efisiensi 3 dan 4 sudu.

5. Nugroho,dkk
(2020)

*Slotted Blade Effect
On Savonius Wind
Rotor Performance*

Turbin Savonius dengan variasi posisi *slotted blades* 25 % pada *overlap ratio* 15% mendapat hasil yang optimal. Kemudian penggunaan variasi turbin angin Savonius dengan sudu *slotted* dapat meningkatkan koefisien daya (C_p) sebesar 14,4 % dibandingkan dengan rotor Savonius konvensional.
