

## BAB II

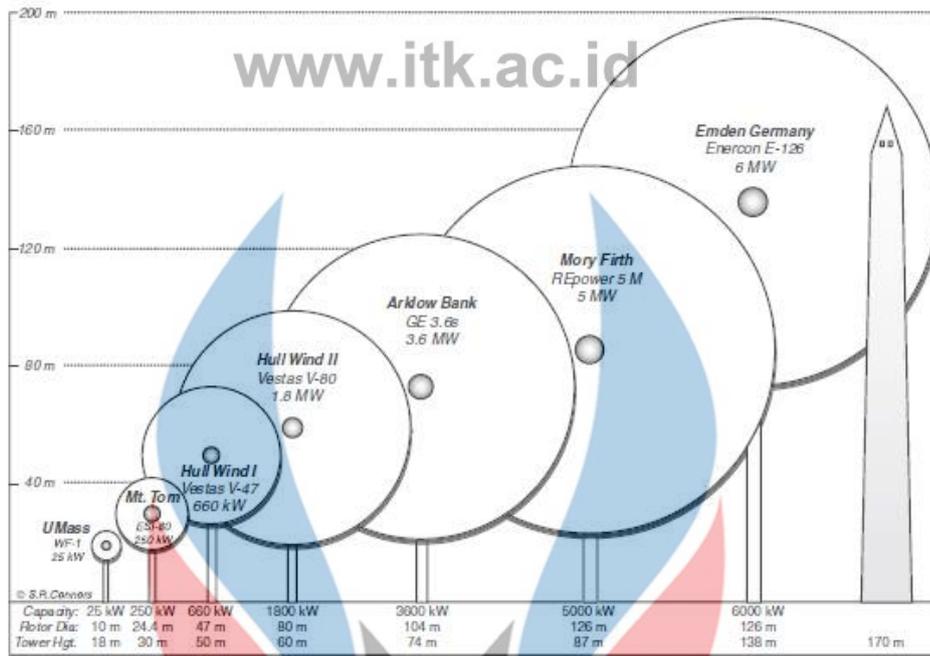
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Konversi Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu jenis dari energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan. Pemanfaatan energi angin dapat dilakukan dengan menggunakan sistem konversi angin seperti turbin angin yang dapat mengkonversinya menjadi energi mekanik. Energi angin sendiri merupakan banyaknya energi kinetik yang dapat dihasilkan dari aliran udara yang dikonversi sehingga besarnya energi angin bergantung pada besar kecepatan angin ( $V$ ) (Zahra, 2008).

Turbin angin merupakan alat konversi energi angin menjadi energi mekanik. Daya ( $P$ ) angin sendiri merupakan hasil dari setengah kali massa jenis udara ( $\rho$ ) dengan luas penampang cakupan dari turbin angin ( $A$ ) dan pangkat tiga dari kecepatan angin ( $V^3$ ). Jika, selisih kecepatan angin ( $V$ ) kecil, maka perbedaan daya ( $P$ ) yang dihasilkan dua kali lipat lebih besar. Jari-jari turbin yang digunakan sebesar 1 m dan massa jenis udara ( $\rho$ )  $1,225 \text{ kg/m}^3$  maka pada kecepatan angin ( $V$ ) 3 m/s daya ( $P$ ) yang dihasilkan 52 W, sedangkan pada kecepatan angin ( $V$ ) 6 m/s daya ( $P$ ) yang dihasilkan lebih besar yaitu 415 W (Zahra, 2008).

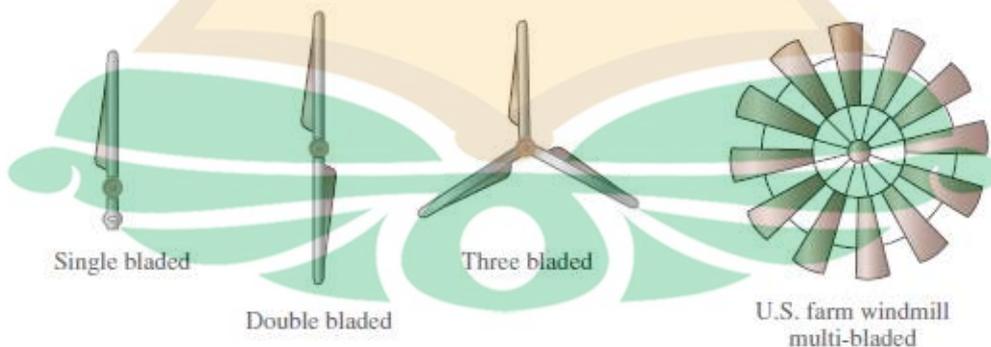
Turbin angin dapat dikategorikan dari sumbu rotasi yaitu turbin angin sumbu horizontal (TASH) dan turbin angin sumbu vertikal (TASV) (Cengels dan John 2013). Turbin angin sumbu horizontal (TASH) merupakan turbin angin yang poros utamanya berputar sesuai dengan arah angin. Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) adalah turbin angin yang sumbu putar porosnya tegak lurus dengan arah aliran angin sehingga dapat menerima angin dari segala arah. Berdasarkan ukuran rotor, turbin angin dapat dikategorikan sesuai dengan ketinggian dan kapasitasnya. Adapun klasifikasinya adalah seperti pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Tipe turbin angin berdasarkan ketinggian dan kapasitasnya (Manwell dkk, 2009)

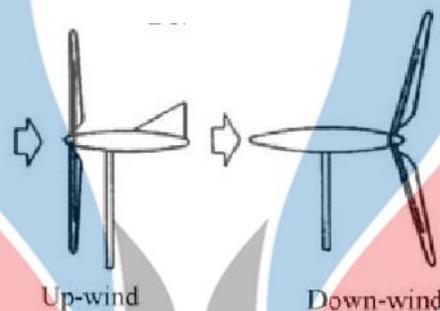
## 2.2 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin angin sumbu horizontal merupakan turbin angin yang poros utamanya berputar sesuai arah angin. Turbin angin sumbu horizontal, arah angin harus sejajar dengan poros turbin. Turbin angin jenis ini mempunyai *blade* berbentuk *airfoil* seperti bentuk sayap pesawat. Jenis turbin angin sumbu horizontal berdasarkan jumlah *blade* atau bilahnya, dibagi menjadi empat jenis yaitu satu bilah (*single blade*), dua bilah (*two blade*), tiga bilah (*three blade*), dan banyak bilah (*multi blade*) seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Turbin angin horizontal berdasarkan jumlah *blade* (Cengel dan John, 2013)

Jumlah *blade* yang digunakan semakin banyak, maka semakin mudah turbin untuk melakukan *starting* awal akibat semakin banyaknya daerah sapuan rotor, namun semakin banyak juga *losses* aerodinamis (*losses* yang diakibatkan *drag force* karena luasnya penampang turbin). Sebagian besar turbin menggunakan jenis tiga *blade* karena lebih stabil dan seimbang sehingga beban aerodinamisnya lebih seragam. Berdasarkan arah datangnya angin, turbin angin horizontal dibagi menjadi dua, yaitu *upwind* dan *downwind* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Turbin angin sumbu horizontal berdasarkan arah angin (Manwell dkk, 2009)

Aliran angin pada turbin angin *upwind*, akan secara langsung melewati rotor terlebih dahulu terhadap arah angin, sehingga diperlukan mekanisme *yaw* untuk menjaga rotor tetap menghadap arah angin. Turbin *downwind*, letak rotor turbin *downwind* berada di belakang tiang turbin, sehingga tidak diperlukan mekanisme *yaw*, namun ada kemungkinan aliran angin tidak merata saat menumbuk *blade* akibat melewati tiang menara turbin terlebih dulu (Manwell dkk, 2009). Turbin angin terdiri dari banyak komponen, komponen turbin yang umum seperti *blade*, generator dan *controller* (Zahra, 2008).

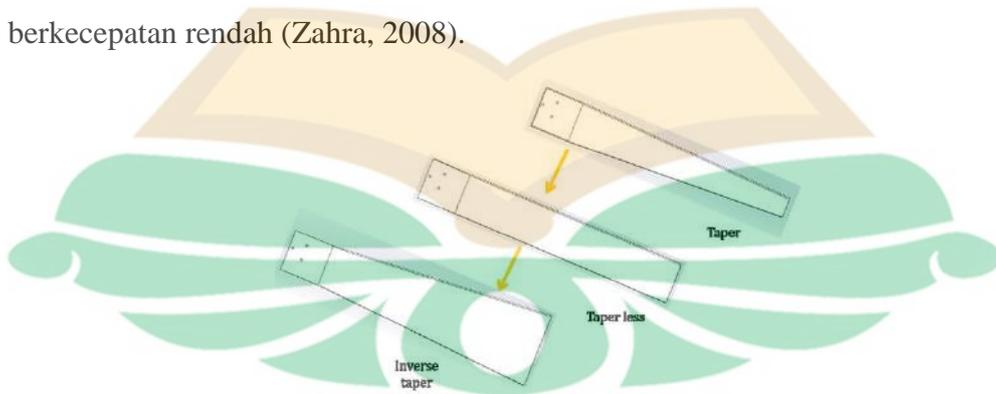
### 2.2.1 Blade

*Blade* merupakan bagian penting dalam suatu sistem pembangkit listrik turbin angin, yang berinteraksi langsung terhadap angin. Semakin cepat putaran *blade* terhadap angin, maka semakin besar gaya dorong yang akan dihasilkan. Selain gaya dorong yang bekerja sejajar dengan arah aliran angin, ada juga gaya angkat yang bekerja tegak lurus dengan arah aliran angin. Koefisien *lift* ( $C_L$ ) dan koefisien *drag* ( $C_D$ ) *airfoil blade* yang digunakan mempengaruhi besarnya gaya

angkat dan gaya dorong yang mengenai suatu *blade*. Beberapa parameter dalam merancang suatu *blade* adalah:

1. *Angle of attack* ( $\alpha$ ), sudut antara chord line dengan arah gerak aliran udara relatif.
2. *Flow angle* ( $\Phi$ ), kecepatan angin ( $V$ ) yang melewati permukaan *blade* dan kecepatan angin ( $V$ ) yang bertiup berlawanan akibat dari putaran *blade* “headwind”.
3. *Twist* atau sudut puntir ( $\beta$ ) adalah sudut antara *chord line* dengan bidang rotasi rotor.
4. Koefisien daya ( $C_p$ ), kemampuan *blade* menyerap energi angin yang diterimanya. Berdasarkan Teorema Betz, maksimal energi angin yang bisa diserap *blade* adalah sebesar 59%.
5. *Tip speed ratio* ( $\lambda$ ) adalah perbandingan antara kecepatan linier putaran ujung *blade* dengan kecepatan angin ( $V$ ).
6. Panjang *blade*, mempengaruhi berapa banyak energi angin yang dapat diperoleh berdasarkan luas area sapuan *blade*.

*blade* turbin angin dapat dikategorikan menjadi 3 jenis yaitu pada Gambar 2.4, *blade taper* dengan ujung yang lebih kecil dari bagian pangkalnya, *blade taperless* dengan lebar ujung dan pangkal *blade* sama, dan juga *blade inverse taper* dengan ujung yang lebih besar daripada pangkalnya. *Blade taper* merupakan *blade* yang lebih cocok digunakan pada kondisi angin berkecepatan tinggi, *blade taperless* untuk kondisi angin sedang dan *blade inverse taper* untuk kondisi angin berkecepatan rendah (Zahra, 2008).



Gambar 2.4 Jenis *blade* berdasarkan bentuknya (Zahra, 2008)

### 2.2.2 Generator

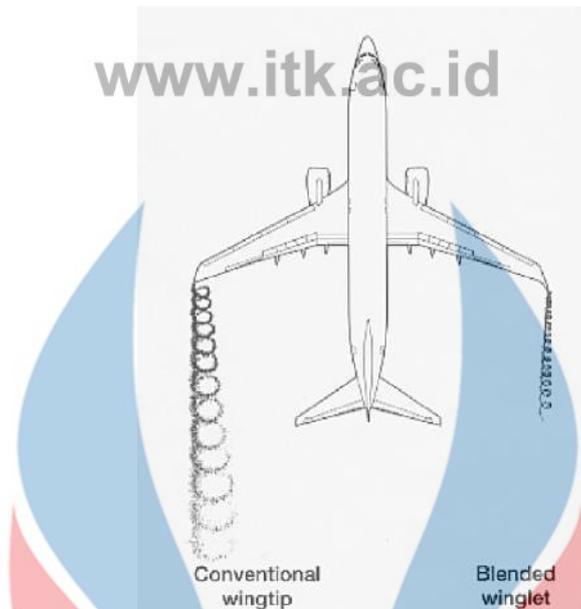
Generator merupakan alat konversi energi mekanik menjadi energi listrik. Generator dirancang dengan menyesuaikan karakter titik putaran *blade* sehingga proses konversi energi mekanik menjadi energi listrik memiliki efisiensi yang tinggi (Zahra, 2008).

### 2.2.3 Controller

*Controller* berperan sebagai alat konversi energi listrik AC menjadi DC dan pengatur sistem tegangan masukan yang fluktuatif dari generator untuk distabilkan sebelum disimpan ke baterai. Aspek utama dalam *controller* turbin angin, yaitu *rectifier* dan MPPT (*Maximum Power Point Tracker*). *Rectifier* berperan dalam mengkonversi tegangan AC menjadi tegangan DC sehingga sesuai dengan media penyimpanan listrik yaitu baterai DC. MPPT adalah suatu rangkaian DC yang mengoptimalkan keluaran daya (P) dari generator sebelum dialirkan untuk disimpan ke baterai (Zahra, 2008).

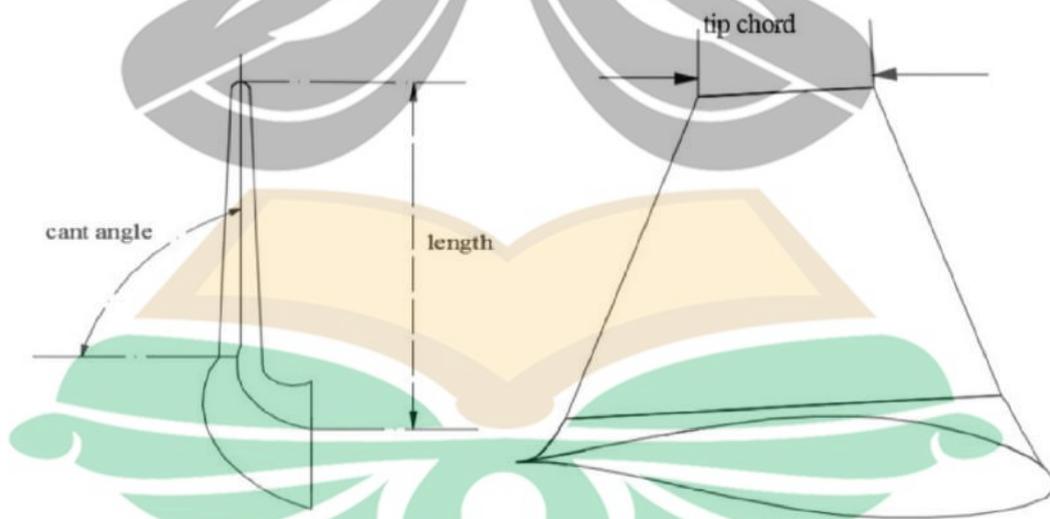
## 2.3 Winglet

Penggunaan *winglet* pada turbin angin horizontal merupakan bentuk pengembangan dari turbin angin yang bertujuan untuk mengurangi *induced drag* pada turbin angin yang berputar di kecepatan angin (V) rendah untuk meningkatkan daya (P) *output*. Aliran yang terjadi pada rotor adalah aliran tiga dimensi yang mengakibatkan timbulnya *tip vortex* pada ujung sudu turbin angin seperti Gambar 2.5. Pembentukan *tip vortex* ini memerlukan energi, akibatnya energi yang dihasilkan turbin angin akan berkurang. Transfer energi dari sudu ke udara dinamakan *induced drag*. Besarnya *induced drag* berbanding terbalik dengan kuadrat kecepatan, pada kecepatan tinggi *induced drag* kecil dan pada kecepatan rendah *induced drag* besar. Penggunaan *winglet* pada ujung sudu turbin angin dapat mengurangi *induced drag*, sehingga meningkatkan besarnya energi yang dihasilkan. Jenis *winglet* dibagi menjadi 3 jenis, yaitu tipe *upstream*, *downstream*, dan *combination* (gabungan) (Handayani dan Sutrisno, 2007).



Gambar 2.5 *Tip vortex* pada pesawat dengan dan tanpa *winglet* (Galdamez, 2011)

Desain *winglet* dan perkiraan fenomena aliran yang mungkin terjadi pada ujung sudu turbin angin seperti desain *winglet* pada pesawat terbang. Parameter perancangan *winglet* memiliki parameter yang sama dengan parameter perancangan *blade*. Parameter *winglet* sendiri meliputi tinggi, *cant angle winglet*, dan *tip chord* seperti pada Gambar 2.6

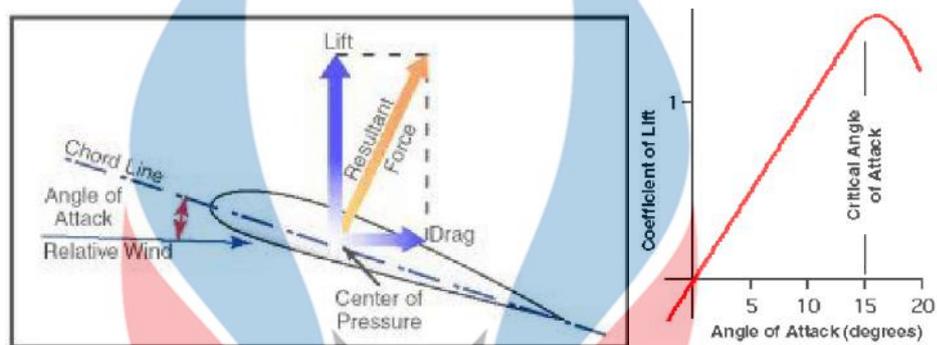


Gambar 2.6 Skema *winglet* (Yiru dkk, 2019)

#### 2.4 *Airfoil*

*Airfoil* adalah struktur dengan bentuk geometri tertentu yang digunakan untuk menghasilkan kekuatan mekanik karena gerakan relatif *airfoil* dan fluida di

sekitarnya. *Blade* turbin angin menggunakan *airfoil* untuk meningkatkan kekuatan mekanik. Penampang *blade* turbin angin memiliki bentuk *airfoil*. Lebar dan panjang *blade* adalah fungsi dari kinerja aerodinamika yang diinginkan, daya ( $P$ ) rotor maksimum yang diinginkan, sifat *airfoil* yang diasumsikan, dan pertimbangan kekuatan (Ghofar, 2018).

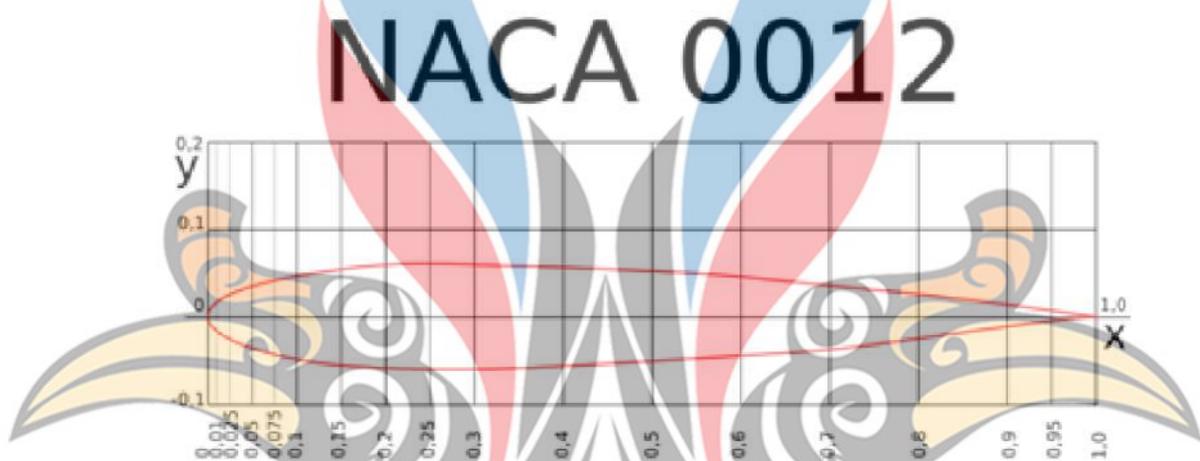


Gambar 2.7 Kurva koefisien *lift* ( $C_L$ ) dibandingkan dengan *angle of attack* ( $\alpha$ ) (Ghofar, 2018)

Distribusi kecepatan dan tekanan, serta *lift* pada *airfoil* berdasarkan Gambar 2.7, jika *airfoil* dikenai aliran udara, maka bentuk *chamber* (lengkung) dari *airfoil* menghasilkan distribusi kecepatan dan tekanan statik. Kecepatan pada lengkung atas lebih besar dari pada kecepatan pada lengkung bawah, maka tekanan statik pada lengkung bawah lebih besar dari pada lengkung atas. Perbedaan tekanan statik antara permukaan bawah *airfoil* yang lebih tinggi dari pada tekanan statik pada permukaan atas *airfoil*, menghasilkan resultan gaya yang disebut gaya aerodinamik. Gaya aerodinamik dapat diuraikan menjadi dua komponen gaya, yaitu gaya angkat atau *lift* dan gaya hambat atau *drag*. *Lift* adalah komponen gaya aerodinamik yang tegak lurus relatif *wind* (vector kecepatan udara relatif terhadap sayap), sedangkan *drag* adalah komponen gaya aerodinamik yang sejajar dengan relatif *wind*. *Lift* merupakan fungsi dari kecepatan udara relatif, *density* udara ( $\rho$ ), luas sayap, dan koefisien *lift* ( $C_L$ ). Besar koefisien *lift* ( $C_L$ ) dipengaruhi oleh bentuk geometri sayap dan sudut serang atau *angle of attack* ( $\alpha$ ). *Angle of attack* ( $\alpha$ ) adalah sudut yang dibentuk oleh relatif *wind* dan *chord*. Saat besar *angle of attack* ( $\alpha$ ) rendah sampai sedang, nilai koefisien *lift* ( $C_L$ ) meningkat secara linear terhadap penambahan *angle of attack* ( $\alpha$ ). Saat mendekati sudut serang *stall*,

peningkatan koefisien *lift* ( $C_L$ ) menjadi lebih kecil dibanding dengan peningkatan *angle of attack* ( $\alpha$ ). Akhirnya pada saat *angle of attack* ( $\alpha$ ) *stall* dilampaui, maka nilai koefisien *lift* ( $C_L$ ) turun dan fenomena inilah yang disebut *stall* ilustrasi (Ghofar, 2018).

Jenis *airfoil* terbagi dalam beberapa jenis tetapi, *airfoil* yang paling yang sering digunakan yaitu *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA). *Airfoil* NACA terbagi dalam beberapa jenis sesuai jumlah digit, salah satunya yaitu empat digit seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Airfoil* NACA 0012 (Ghofar, 2018)

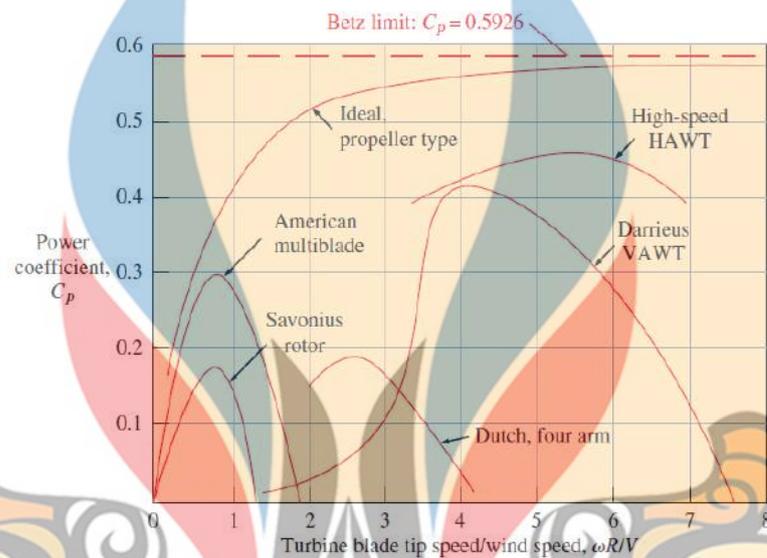
NACA melakukan pengujian pada tahun 1932 terhadap beberapa bentuk *airfoil* yang dikenal dengan NACA seri 4 digit. Digit pertama pada *airfoil* NACA seri empat menyatakan persen maksimum *chamber* terhadap panjang *chord*. Digit kedua menyatakan persepuluh posisi maksimum *chamber* pada *chord* dari *leading edge*, sedangkan dua digit terakhir menyatakan persen ketebalan *airfoil* terhadap *chord* (Ghofar, 2018).

## 2.5 Performa Turbin Angin

### 2.5.1 Koefisien Daya ( $C_P$ )

Koefisien daya ( $C_P$ ) merupakan kemampuan *blade* menyerap energi angin yang diterimanya. Teorema Betz limit, maksimal energi angin yang bisa diserap *blade* adalah sebesar 59%. Turbin angin yang mengonversi energi angin,

kecepatannya dipelankan dari sebelumnya. Kecepatan anginnya ( $V$ ) dihilangkan, maka akan menyebabkan udara terhenti, sehingga menyebabkan udara di sekitar *blade* menjadi diam. Udara yang melewati *blade* harus dibiarkan sebagian lepas dengan kecepatan tertentu dan sebagian lagi digunakan sebagai energi kinetik (Piggott, 1997).



Gambar 2.9 Kinerja koefisien daya ( $C_p$ ) berdasarkan jenis turbin angin (Cengel dan John, 2013)

Turbin Angin dengan efisiensi semakin tinggi, semakin maksimal pula turbin tersebut mengkonversi energi yang didapatnya. Tipe turbin yang memiliki tingkat efisiensi paling tinggi terlihat pada Gambar 2.9 adalah *high-speed HAWT* ( $C_p$  45%) adapun yang terendah adalah, tipe *savonius* dan *dutch*. Tipe *high-speed HAWT* adalah turbin angin 2 dan 3 *blade propeller* saat ini banyak dijumpai pada produk-produk komersil (Zahra, 2008).

### 2.5.2 Koefisien Torsi ( $C_T$ )

Koefisien torsi ( $C_T$ ) adalah rasio perbandingan antara torsi aktual hasil dari ekstrak energi pada rotor dan torsi teoretis. Adapun Persamaan 2.1 untuk torsi rotor (Mathew, 2007).

Torsi Teoretis

$$:T_{teoretis} = \frac{1}{2} \rho A V^2 r \quad (2.1)$$

Nilai  $T_{Teoretis}$  adalah torsi teoretis dalam satuan (N.m).  $V$  sebagai kecepatan angin dengan satuan m/s,  $\rho$  adalah massa jenis udara ( $\rho$  rata-rata =  $1,225 \text{ kg/m}^3$ ), dan  $r$  adalah jari-jari turbin angin dengan satuan m (Mathew, 2007).

Maka, Persamaan 2.2 untuk koefisien torsi ( $C_T$ ) (Mathew, 2007).

$$\text{Koefisien Torsi} \quad : C_T = \frac{T_{\text{aktual}}}{T_{\text{teoretis}}} \quad (2.2)$$

### 2.5.3 Tip speed ratio ( $\lambda$ )

*Tip speed ratio* ( $\lambda$ ) yaitu rasio kecepatan sudu terhadap kecepatan udara. Rasio kecepatan ini merupakan parameter penting untuk analisa pada turbin angin, *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan 2.3 (Manwell dkk, 2009).

$$\text{Tip Speed Ratio} \quad : \lambda = \frac{2\pi r n}{60V} \quad (2.3)$$

Dimana  $\lambda$  adalah *Tip speed ratio*,  $n$  adalah putaran poros dalam (rpm),  $r$  adalah jari-jari rotor dalam satuan (m) dan  $V$  adalah kecepatan angin dalam satuan (m/s).

Nilai *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) semakin besar maka semakin tinggi juga efisiensi dari turbin angin terlihat pada Gambar 2.10 (Martin, 2008). Pertimbangan sebagai perancangan desain awal, nilai *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) yang paling baik untuk turbin angin dengan jumlah sudu 3 adalah sekitar 6 sampai 8, yang mengindikasikan bahwa turbin angin dapat bekerja dengan koefisien daya ( $C_P$ ) yang hampir maksimal (Piggott, 1997). Berdasarkan persamaan tersebut juga dapat dijelaskan bahwa terdapat hubungan yang berbanding terbalik antara kecepatan putar rotor dengan jarak sudu. Sudu dengan jarak yang besar memiliki kecepatan putar yang rendah pada nilai *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) yang sama. Adapun Persamaan 2.4 yang dapat melihat hubungan dari koefisien daya ( $C_P$ ), koefisien torsi ( $C_T$ ) dan *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) (Manwell dkk, 2009).

$$\text{Tip Speed Ratio} \quad : \lambda = \frac{C_P}{C_T} \quad (2.4)$$

## 2.6 Computational Fluid Dynamics (CFD)

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) digunakan dalam penelitian mengenai analisa aliran dinamika fluida. CFD menyediakan simulasi aliran dengan solusi *numeric*. Selain itu, CFD juga digunakan pada penelitian mengenai analisa rancangan turbin angin sehingga dapat diketahui performa dari turbin angin. CFD juga mampu melakukan komputasi distribusi tekanan, kecepatan aliran fluida dan lain sebagainya (Natayuda, 2017).

Proses simulasi diperlukan tiga langkah dasar yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*. Langkah *pre-processing* dilakukan pembuatan model geometri sesuai parameter yang ditentukan, dilanjutkan dengan pembuatan *domain* untuk membatasi bidang kerja, setelah itu pemodelan dibagi menjadi bagian-bagian kecil (*grid*) atau biasa disebut *meshing*. Bagian-bagian kecil dari model akan terjadi perhitungan secara numerik oleh perangkat lunak CFD. Jumlah *grid* yang dibuat semakin banyak maka kualitas akan semakin baik. Langkah *processing* dilakukan proses simulasi yang akan menghasilkan data-data sebagai hasil dari proses simulasi. Langkah *post-processing* dilakukan analisa hasil simulasi secara keseluruhan data yang dihasilkan dari proses simulasi selanjutnya dapat dilakukan validasi data (Philip dan John, 2011).

Simulasi dua dimensi, bentuk sel dasar pada elemen yang tidak terstruktur diantaranya adalah *triangular* dan *quadrilateral*, sedangkan bentuk sel untuk elemen yang terstruktur adalah *rectangular*. Simulasi tiga dimensi, bentuk sel yang umumnya digunakan untuk elemen yang tidak terstruktur adalah *tetrahedral* dan *pentrahedral*, sedangkan bentuk sel yang digunakan untuk elemen yang terstruktur adalah *heksahedral* (Bhaskaran dan Collins, 2016).

Kualitas dari *mesh* sangat menentukan hasil dari simulasi sehingga nilai kesalahan yang terjadi dapat diminimalisasi. Semakin banyak sel pada *mesh*, maka semakin besar juga waktu komputasi untuk menyelesaikan analisa simulasi pada permasalahan aerodinamika (Bhaskaran dan Collins, 2016).

## 2.7 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian yang dilakukan, diperlukan pengkajian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya yang serupa sebagai bahan referensi atau acuan. Penelitian terdahulu yang dijadikan referensi pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu

Nama dan Tahun Publikasi	Variasi	Judul Referensi	Hasil
(Madi 2016)	Variasi Jenis Airfoil	Studi Perancangan <i>Horizontal Axis Wind Turbine</i> dengan Perbedaan Desain <i>Airfoil</i> pada Bilah Jenis <i>Taper</i> Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin Laut	<i>Airfoil</i> NACA 4412 memiliki nilai efisiensi sebesar 52%, lebih besar dibandingkan <i>airfoil</i> Clark-Y, NACA 4412, NACA 3612, NACA 4418, NACA 0012, dan NACA 0018 pada turbin angin sumbu horizontal dengan jenis bilah <i>taper</i> .
(Zhu dkk, 2017)	Variasi Jenis Winglet	<i>Performance Characteristics Of A Horizontal Axis Turbine With Fusion Winglet</i>	<i>Winglet</i> dengan bentuk yang menghadap ke hisapan turbin, dan <i>winglet</i> dengan bentuk menghadap ke tekanan, mengalami peningkatan koefisien daya ( $C_p$ ) pada <i>tip speed ratio</i> ( $\lambda$ ) 7 dengan <i>cant angle</i> $90^\circ$ yaitu 2,42% dan 3,61% dari turbin angin tanpa <i>winglet</i> .
(Khaled dkk, 2019)	Variasi Tinggi (H) Winglet	<i>Investigation of A Small Horizontalexaxis Wind Turbine</i>	Variasi tinggi (H) untuk <i>winglet</i> 1% hingga 7% dari panjang rotor,

Nama dan Tahun Publikasi	Variasi	Judul Referensi	Hasil
		<i>Performance With and Without Winglet</i>	mengalami peningkatan maksimum dari koefisien daya ( $C_p$ ) 0,4468 menjadi 0,4907, (meningkat sebesar 9,83%) untuk <i>winglet</i> dengan panjang 7% dari panjang rotor pada <i>tip-speed rasio</i> ( $\lambda$ ) desain.
(Yuri dkk, 2019)	<i>Variasi Cant Angle Winglet</i>	<i>Influences Of Winglets On The Hydrodynamic Performance Of Horizontal Axis Current Turbines</i>	Pada <i>tip speed ratio</i> ( $\lambda$ ) optimal, koefisien daya ( $C_p$ ) terbaik diperoleh dengan konfigurasi <i>cant angle</i> (CA) $90^\circ$ , yang koefisien daya ( $C_p$ ) 3,70% lebih tinggi daripada turbin dasar. Untuk memperoleh peningkatan daya di seluruh kondisi, <i>cant angle winglet</i> (CA) tidak boleh kurang dari $80^\circ$ .