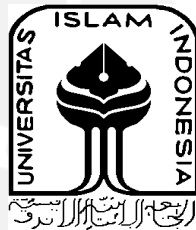


**STUDI PADA PENGARUH VARIASI *CHAMBER* DAN
THICKNESS TERHADAP *AIRFOIL* DENGAN DAYA 500 WATT**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin**



Disusun Oleh:

Nama : Muhammad Reza Rizqi Pahlawan
No. Mahasiswa : 16525056
NIRM : 2016060866

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2020/2021**

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa karya tulis ilmiah yang saya buat ini merupakan hasil karya saya sendiri dibawah bimbingan dari dosen pembimbing saya yaitu Bapak Rahmat Riza, S.T., M.Sc.ME. Karya ini bukanlah karya tulis ilmiah yang pernah dipublikasi sebelumnya, kecuali kutipan serta referensi yang telah saya jelaskan dan cantumkan setiap sumbernya. Apabila dikemudian hari pengakuan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia untuk menerima hukuman atau sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Yogyakarta, 13 Agustus 2021

Penulis



(Muhammad Reza Rizqi P.)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**STUDI PADA PENGARUH VARIASI *CHAMBER* DAN
THICKNESS TERHADAP *AIRFOIL* DENGAN DAYA 500
WATT**

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh:

Nama : Muhammad Reza Rizqi Pahlawan
No. Mahasiswa : 16525056
NIRM : 2016060866

Yogyakarta, Juli 2021

Pembimbing,



Rahmat Riza, S.T., M.Sc.ME

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

STUDI PADA PENGARUH VARIASI *CHAMBER* DAN *THICKNESS* TERHADAP *AIRFOIL* DENGAN DAYA 500 WATT

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh:

Nama : Muhammad Reza Rizqi Pahlawan


No. Mahasiswa : 16525056

NIRM : 2016060866

Tim Penguji

Rahmat Riza, S. T., M. Sc. ME

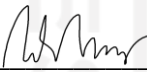
Ketua



Tanggal: 6 Agustus 2021

Agung Nugroho Adi, S. T., M. T

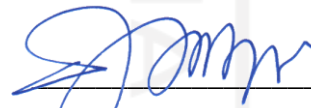
Anggota I



Tanggal: 6 Agustus 2021

Santo Ajie Dhewanto, S. T., M. M

Anggota II




Tanggal: 6 Agustus 2021

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin





Dr. Eng. Risdiyono, S. T., M. Eng

HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini penulis persembahkan kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya dan sebagai perwujudan sebagai hamba yang telah menuntut ilmu untuk meninggikan derajatnya.
2. Bapak dan ibu saya yang terhormat yang telah menjadi *support system* garda utama, kemudian merawat dan membesarkan penulis hingga dapat menempuh pendidikan sampai dengan saat ini.
3. Bapak Rahmat Riza, S. T., M.Sc. ME selaku Dosen Pembimbing dari pihak kampus
4. Teh Inayah Zahra, S. T., M. T. selaku pembimbing dari pihak PT. Lentera Bumi Nusantara
5. Teman teman jurusan yang telah menemani penulis dari awal masa perkuliahan sampai pada saat ini.
6. Kepada *circle*, saat ini *just friend*, kontrakan ucap dan seseorang di kec. Boja sana yang selalu menjadi *support system* penulis.
7. Kepada PT. Lentera Bumi Nusantara beserta jajarannya dan mahasiswa Cihuy University yang sedang melakukan penelitian disana yang telah membantu dan menemani penulis dalam melakukan penelitian disana.
8. Terimakasih juga kepada *support system* saya sekarang yang selalu menemani dan mendukung di setiap situasi saya baik yang dijogja, dan diluar jogja.

HALAMAN MOTTO

“Dan mereka berkata ‘ sekiranya kamu mendengarkan atau memikirkan (peringatan itu) niscaya tidaklah kami termasuk penghuni-penghuni neraka yang menyala-nyala.’” - (QS. Al Mulk 67:10)

“Barang siapa menginginkan kebahagiaan dunia, maka tuntutlah ilmu dan barang siapa yang ingin kebahagiaan akhirat, tuntutlah ilmu dan barangsiapa yang menginginkan keduanya, tuntutlah ilmu pengetahuan.” - Sabda Rasulullah SAW

“Agama tanpa ilmu pengetahuan adalah buta. Dan ilmu pengetahuan tanpa agama adalah lumpuh.” – Albert Einstein

“Kalau mau menunggu sampai siap, kita akan menghabiskan sisa hidup kita hanya untuk menunggu.” – Lemony Snicket

” Hiduplah seakan-akan kau akan mati besok. Belajarlah seakan-akan kau akan hidup selamanya.” – Mahatma Gandhi

” Bukan karena ada hal yang sulit kita jadi tidak berani. Justru karena kita tidak beranilah hal itu jadi sulit.” - Seneca

KATA PENGANTAR ATAU UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan karunianya, sehingga penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan skripsi ini. Tidak lupa juga sholawat dan salam tercurah kepada Nabi Muhammad Sholallahu Alaihi Wasalam.

Dengan selesainya penyusunan skripsi ini, penulis berterimakasih kepada pihak pihak yang terlibat dan banyak membantu dalam terlaksananya kegiatan penelitian dan proses penyusunan naskah skripsi ini. Terutama kepada dosen pembimbing penulis yang telah membimbing dari awal penelitian hingga akhir penulisan naskah skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa naskah skripsi ini masih sangat jauh dari kata sempurna. Penulis sangat terbuka untuk menerima kritik dan saran yang membangun untuk kesempurnaan laporan ini. Penulis berharap laporan ini bermanfaat umumnya pembaca dan khususnya untuk penulis sendiri.

Yogyakarta, Juli 2021



Penulis

ABSTRAK

Energi angin merupakan sumber energi yang dapat diperbarui, yang berarti bahwa sumber energi ini harus dimanfaatkan. Kemudian, di beberapa daerah dibangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) untuk memanfaatkan energi ini. Dalam pembangunannya, terdapat parameter-parameter penting, salah satunya adalah pemilihan jenis *airfoil* yang digunakan pada bilah sebuah pltb. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh karakteristik *airfoil* terhadap *airfoil* yang akan digunakan pada bilah tersebut. Adapun pemilihan *airfoil* seperti NACA 3412, 4410, 4412, 4414, dan 5412 kemudian dirancang dengan menggunakan bilah jenis *taper* dan *taper less*, dan dilakukan simulasi untuk mendapatkan nilai C_p dari kurva C_p terhadap TSR menggunakan *software* Qblade v.0.963. Berdasarkan hasil simulasi, bilah jenis *taper* dengan *airfoil* NACA 3412 yang memperoleh nilai C_p sebesar 39,6% untuk variasi *chamber airfoil* dan bilah jenis *taper less* dengan *airfoil* NACA 4410 yang memperoleh nilai C_p sebesar 39,2% untuk variasi *thickness airfoil*. Pada proses validasi menggunakan *software*, didapatkan bahwa daya yang dihasilkan pada daerah kota jogja dengan *airfoil* NACA 3412 sebesar 87,8 W dan NACA 4410 sebesar 86,8 W, dan untuk didaerah bandara YIA dengan *airfoil* NACA 3412 sebesar 348,4 W dan NACA 4410 sebesar 344,7 W.

Kata kunci: Energi angin, pembangkit listrik tenaga bayu, bilah, *airfoil*, NACA.

ABSTRACT

Wind energy is a renewable energy source, which means that this energy source must be utilized. Then, in several areas, wind power plants (PLTB) were built to utilize this energy. In its construction, there are important parameters, one of which is the selection of the type of airfoil used on the blades of a pltb. This study aims to determine the effect of airfoil characteristics on the airfoil that will be used on the blade. The selection of airfoils such as NACA 3412, 4410, 4412, 4414, and 5412 were then designed using taper and taper less blades, and simulations were carried out to obtain the Cp value of the Cp curve against TSR using Qblade v.0.963 software. Based on the simulation results, the taper blade with NACA 3412 airfoil obtained a Cp value of 39.6% for the variation of the chamber airfoil and the taper less blade with the NACA 4410 airfoil obtained a Cp value of 39.2% for the variation of airfoil thickness. In the validation process using software, it was found that the power generated in the Yogyakarta city with NACA 3412 airfoils was 87.8 W and NACA 4410 was 86.8 W, and for YIA airport areas with NACA 3412 airfoils was 348.4 W and NACA 4410 of 344.7 W.

Keywords: Wind energy, wind power plant, blade, airfoil, NACA

DAFTAR ISI

Pernyataan Keaslian	ii
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing	iii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji	iv
Halaman Persembahan	v
Halaman Motto	vi
Kata Pengantar atau Ucapan Terima Kasih	vii
Abstrak	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
Daftar Isi	x
Daftar Tabel	xii
Daftar Gambar	xiv
Daftar Notasi	xv
Bab 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan	3
1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
Bab 2 Tinjauan Pustaka	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	7
2.2.1 Energi angin	7
2.2.2 Konsep turbin angin skala mikro dan klasifikasinya	8
2.2.3 Desain <i>blade</i>	11
2.2.4 Panjang bilah	16
2.2.5 Geometri bilah	17
2.2.6 Sudut aerodinamis pada penampang <i>airfoil</i>	19
2.2.7 <i>Wind power parameter</i>	21

Bab 3 Metode Penelitian	23
3.1 Alur Penelitian	23
3.2 Kriteria Desain	25
3.3 Peralatan penelitian	26
3.3.1 Laptop	26
3.3.2 Perangkat lunak Qblade V. 0.963	26
3.4 Perancangan	26
3.4.1 Spesifikasi TSD-500 Di PT. Lentera Bumi Nusantara	27
3.4.2 Perancangan Perangkat Lunak	27
Bab 4 Hasil dan Pembahasan	30
4.1 Hasil perancangan	30
4.1.1 Perancangan jari-jari bilah	30
4.1.2 Pemilihan <i>airfoil</i>	31
4.1.3 Perancangan geometri bilah	32
4.1.4 Simulasi bilah dengan perangkat lunak Qblade V.0.963	54
4.2 Analisis dan Pembahasan	56
Bab 5 Penutup	65
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya	65
Daftar Pustaka	66
LAMPIRAN 1 Perancangan bilah TASH Tapeless dan taper	68

DAFTAR TABEL

Tabel 4 - 1 Karakteristik <i>airfoil</i> untuk variasi <i>chamber</i>	32
Tabel 4 - 2 Karakteristik <i>airfoil</i> untuk variasi <i>thickness</i>	32
Tabel 4 - 3 Jari-jari parsial untuk bilah <i>taper less</i> 4412	34
Tabel 4 - 4 <i>Tip Speed Ratio</i> untuk bilah <i>taper less</i> 4412.....	35
Tabel 4 - 5 <i>Flow angle</i> untuk bilah <i>taper less</i> 4412	36
Tabel 4 - 6 <i>Coefisien of Lift</i> bilah jenis <i>taper less</i> 4412	37
Tabel 4 - 7 <i>Aplha</i> bilah jenis <i>taper less</i> 4412	38
Tabel 4 - 8 <i>Twist</i> bilah jenis <i>taper less</i> 4412	39
Tabel 4 - 9 Data perancangan bilah jenis <i>taper less</i> dengan <i>airfoil</i> NACA 4412	40
Tabel 4 - 10 Data perancangan bilah jenis <i>taper less</i> dengan <i>airfoil</i> NACA 3412	41
.....	41
Tabel 4 - 11 Data perancangan bilah jenis <i>taper less</i> dengan <i>airfoil</i> NACA 5412	42
.....	42
Tabel 4 - 12 Data perancangan bilah jenis <i>taper less</i> dengan <i>airfoil</i> NACA 4410	43
.....	43
Tabel 4 - 13 Data perancangan bilah jenis <i>taper less</i> dengan <i>airfoil</i> NACA 4414	44
.....	44
Tabel 4 - 14 <i>Flow angle</i> untuk bilah <i>taper</i> 4412	46
Tabel 4 - 15 <i>Twist</i> bilah jenis <i>taper</i> 4412	47
Tabel 4 - 16 <i>Chord</i> bilah jenis <i>taper</i> 4412	48
Tabel 4 - 17 <i>Chord</i> bilah jenis <i>taper</i> setelah disesuaikan dengan spesifikasi turbin angin	49
Tabel 4 - 18 Data perancangan bilah jenis <i>taper</i> dengan <i>airfoil</i> NACA 4412	50
Tabel 4 - 19 Data perancangan bilah jenis <i>taper</i> dengan <i>airfoil</i> NACA 3412	51
Tabel 4 - 20 Data perancangan bilah jenis <i>taper</i> dengan <i>airfoil</i> NACA 5412	52
Tabel 4 - 21 Data perancangan bilah jenis <i>taper</i> dengan <i>airfoil</i> NACA 4410	53
Tabel 4 - 22 Data perancangan bilah jenis <i>taper</i> dengan <i>airfoil</i> NACA 4414	54
Tabel 4 - 23 Variabel penelitian	56
Tabel 4 - 24 Nilai <i>C_p</i> terhadap <i>TSR</i>	59
Tabel 4 - 25 Daya yang dihasilkan	59

Tabel 4 - 26 Performa bilah dengan variasi <i>chamber airfoil</i>	60
Tabel 4 - 27 Performa bilah dengan variasi <i>thickness airfoil</i>	60
Tabel 4 - 28 Perolehan daya teoritis	64



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2 - 1 Turbin angin TASH jenis <i>upwind</i> dan <i>downwind</i>	10
Gambar 2 - 2 Karakteristik bilah	11
Gambar 2 - 3 Sketsa 2d <i>airfoil</i>	11
Gambar 2 - 4 Sketsa karakteristik <i>airfoil</i> dengan C_l , C_d dan α	12
Gambar 2 - 5 Contoh <i>airfoil</i> 4-digit.....	13
Gambar 2 - 6 Anatomi <i>airfoil</i> NACA 4-digit.....	13
Gambar 2 - 7 Perbedaan ketebalan pada <i>airfoil</i>	15
Gambar 2 - 8 Geometri <i>airfoil</i> konvensional.....	16
Gambar 2 - 9 Geometri <i>blade rotor</i>	17
Gambar 2 - 10 <i>Setting angle</i> pada <i>airfoil</i>	19
Gambar 2 - 11 Gaya dan sudut serang pada sebuah <i>propeller blade</i>	21
Gambar 2 - 12 kurva C_p terhadap TSR pada Vestas V80.....	22
Gambar 4 - 1 Karakteristik <i>airfoil</i> NACA 4412.....	31
Gambar 4 - 2 Kurva C_l terhadap <i>angle of attack</i>	37
Gambar 4 - 3 Mencari nilai $\alpha(\alpha)$ atau <i>angle of attack</i> pada kurva C_l terhadap <i>angle of attack</i> bilah jenis <i>taper less</i>	38
Gambar 4 - 4 Nilai maksimal C_l/C_d	45
Gambar 4 - 5 Nilai C_l pada bilah <i>taper</i>	46
Gambar 4 - 6 Penginputan parameter-parameter yang dibutuhkan kedalam perangkat lunak.....	55
Gambar 4 - 7 Hasil desain yang di proses sesuai parameter yang diinput	55
Gambar 4 - 8 Parameter simulasi ROTOR BEM SIMULATION	56
Gambar 4 - 9 Kurva C_p terhadap TSR bilah jenis <i>taper</i>	57
Gambar 4 - 10 Kurva C_p terhadap TSR bilah jenis <i>taper less</i>	58
Gambar 4 - 11 Grafik C_p validasi	62
Gambar 4 - 12 Daya perolehan teoritis kecepatan angin 9,77 m/s.....	63
Gambar 4 - 13 Daya perolehan teoritis kecepatan angin 6,17 m/s.....	63
Gambar 4 - 14 Daya perolehan teoritis kecepatan angin 3,6 m/s.....	63

DAFTAR NOTASI

P_a	= Daya energi angin persatuan waktu (watt)
p_l	= Daya listrik yang ingin dihasilkan oleh turbin angin (watt)
K	= efisiensi sistem turbin angin
η_b	= efisiensi bilah yang digunakan pada turbin angin
η_g	= efisiensi generator yang digunakan pada turbin angin
η_t	= efisiensi transmisi yang digunakan pada turbin angin
η_k	= efisiensi kontroller yang digunakan pada turbin angin
Re	= Bilangan Reynolds
V	= kecepatan uji angin yang digunakan (m/s)
ρ	= kerapatan udara (kg/m^3)
C	= chord bilah yang digunakan (m)
μ	= viskositas dinamis cairan (Ns/m^2)
ν	= viskositas kinematik (m^2/s)
l	= panjang karakter, panjang chord suatu <i>airfoil</i> (m)
A	= Luas Sapuan <i>blade rotor</i> (m^2)
v_{maks}	= Kecepatan angin maksimal (m/s)
R	= Jari-jari <i>blade rotor</i> (m)
n	= jumlah elemen yang digunakan.
r	= jari-jari parsial elemen yang akan dicari (m)
λR	= <i>Tip Speed Ratio</i> bilah
R	= jari-jari bilah (m)
λr	= <i>Tip Speed Ratio</i> parsial pada elemen yang ingin dicari
R	= Jari-jari <i>blade rotor</i> (m)
B	= Jumlah sudu yang digunakan
Cl	= koefisien lift penampang <i>airfoil</i>
Cr	= panjang <i>chord</i> (m)
ϕ	= <i>Flow angle</i> ($^\circ$)
β	= sudut puntir / <i>twist</i> ($^\circ$)
α	= <i>angle of attack</i> ($^\circ$)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik merupakan kebutuhan manusia yang tidak dapat terpisahkan dari kegiatan manusia, karena penggunaannya yang sangat praktis. Berbagai sumber energi primer dapat digunakan untuk dapat menghasilkan listrik, baik yang bersifat terbarukan (*renewable*) maupun tak terbarukan (*non-renewable*). tekanan yang dialami akibat sifatnya yang tak terbarukan, dan memiliki efek negatif terhadap lingkungan secara global, menyebabkan tumbuh pesatnya penggunaan sumber energi terbarukan pada dua dekade terakhir ini, yang salah satunya ialah energi angin.

Energi angin merupakan salah satu sumber energi yang dapat diperbarui, artinya angin ini merupakan sumber daya dari alam yang tidak akan pernah habis atau selalu ada secara terus-menerus, yang berarti sumber energi ini harus dimanfaatkan dengan sebaik mungkin. Pemanfaatan energi angin di Indonesia masih belum cukup intensif dan cenderung belum menjadi prioritas pemerintah. Menurut Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pengembangan teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Indonesia menghadapi beberapa masalah penting yang harus dipecahkan (Sinaga, 2017). Seiring berjalannya waktu, banyak daerah yang dibangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) untuk memanfaatkan energi angin ini. PLTB yang dibangun berskala mikro, kecil, sedang dan besar, dengan jenis turbin angin bersudut horizontal dan vertikal. Salah satu PLTB yang mengimplementasikan pembangkit listrik berjenis turbin horizontal dengan skala mikro adalah PT. Lentera Bumi Nusantara, yang bertempat di Kabupaten Tasikmalaya Kecamatan Cipatujah Desa Ciheras. Pada PT. Lentera Bumi Nusantara menggunakan sistem pltb yang terdiri dari *blade rotor*, *generator*, *controller*, dan *datalogger* memiliki fungsinya masing-masing.

Blade rotor atau baling-baling adalah beberapa bilah dengan penampang *airfoil* yang berinteraksi langsung dengan angin dan memiliki sifat aerodinamis yang dapat mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik melalui poros yang terhubung (Dahlan, 2016). Bilah tersebut memiliki 3 jenis model yaitu

model *taper less*, *taper*, dan *inverse taper*, yang masing-masing jenis tersebut memiliki bentuk penampang *airfoil*.(Rachman et al., 2019)

Airfoil adalah bentuk geometri dasar penampang sebuah bilah yang menghasilkan efek aerodinamika ketika terdapat aliran udara yang melewatinya (Hanif dan Jatisukamto, 2017). Seiring berjalannya waktu, telah dilakukan beberapa penelitian untuk membandingkan *airfoil* dan jenis bilah untuk mencari performa yang terbaik yang salah satu penelitiannya menggunakan *airfoil* berjenis NACA 4412 dengan membandingkan jenis bilah *taper less*, *taper*, dan *inverse taper* didapatkan hasil terbaik oleh bilah jenis *inverse taper* dengan perolehan *Coefisien of power* maksimal sebesar 0,53% pada *Tip Speed Ratio* 4,5 dengan perolehan daya listrik sebesar 5246,15 Wh (Kuntara, 2020). Pada penelitian selanjutnya, dilakukan juga penelitian dengan membandingkan *airfoil* berjenis NACA 4412 dan 4415 dengan menggunakan bilah berjenis *taperless* dan *taper*, hasil dari terbaik diraih oleh *airfoil* NACA 4412 bilah berjenis *taperless* dengan perolehan *Coefisien of power* sebesar 52% pada TSR 7 dengan perolehan daya listrik sebesar 1549,88 Wh (Dahlan, 2016).

Dari beberapa penelitian tersebut, maka dapat diketahui bahwa penentuan jenis *airfoil* dan bilah tersebut dapat mempengaruhi perolehan *Coefisien of Power* terhadap *Tip Speed Ratio*. Sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk membandingkan dan menentukan beberapa karakteristik *airfoil* dengan jenis bilahnya yang dapat menghasilkan kinerja yang lebih baik serta mengetahui kelayakan hasil kinerja dari bilah tersebut untuk diwilayah jawa terutama di Yogyakarta.

1.2 Rumusan Masalah

Proses membandingkan jenis bilah *taper* dan *taper less* dengan *airfoilnya* untuk mendapatkan hasil/performa yang terbaik, maka ditetapkan beberapa rumusah masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana rancangan bilah untuk masing-masing *airfoil*?
2. Bagaimana kinerja dari masing-masing kedua jenis bilah dari masing-masing karakteristik *airfoil* yang telah dirancang?

3. Bagaimana perbandingan dari hasil kinerja masing-masing jenis bilah dengan *airfoil*nya?
4. Karakteristik bilah dan *airfoil* jenis mana yang menghasilkan performa terbaik?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini hanya dibatasi sampai dengan:

1. Penelitian hanya sampai dengan tahap perancangan dan simulasi.
2. Simulasi pengujian performa bilah menggunakan *software* Qblade.
3. *Output* akhir berupa perbandingan grafik *coefisien power* (C_p) terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR) dari berbagai karakteristik *airfoil* dengan jenis atau model bilah *taper*, dan *taper less*.
4. Bilah yang digunakan berjumlah 3 bilah.
5. Material yang digunakan kayu mahoni.

1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Tujuan penelitian yang akan dicapai adalah:

1. Merancang bilah dengan *airfoil* yang berbeda-beda dengan menggunakan 2 jenis atau model bilah yaitu Taperless, dan Taper
2. Mengetahui kinerja dari masing-masing kedua jenis bilah dari masing-masing *airfoil* yang telah dirancang
3. Membandingkan kinerja masing-masing model bilah dengan *airfoil*nya.
4. Mengetahui *airfoil* dengan bilah jenis mana yang dapat memperoleh performa yang baik dari grafik/kurva *Coeficient of Power* (C_p) terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR).

1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Manfaat dari penelitian ini agar dapat mengetahui pengaruh dari perbedaan karakteristik sebuah *airfoil* pada sebuah bilah pada pltb untuk dapat menghasilkan daya listrik yang lebih efisien.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan pada penelitian ini.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang kajian pustaka atau penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, dan dasar teori atau teori-teori dasar yang mendukung penelitian ini.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Berisi tentang alur penelitian beserta penjelasannya, peralatan penelitian yang digunakan, perancangan penelitian yang terdiri dari spesifikasi turbin yang digunakan dan perancangan menggunakan perangkat lunak.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang hasil perancangan awal sampai akhir dari masing-masing jenis bilah *taper less* dan *taper* dengan *airfoil* NACA 3412, 4410, 4412, 4414, dan 5412 sampai dengan tahap simulasinya. Serta analisis dan pembahasan dari simulasi yang telah diperoleh dari perangkat lunak Qblade V. 0.963.

BAB 5 PENUTUP

Berisi tentang kesimpulan dari penelitian ini, dan saran atau penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Energi angin di Indonesia ini memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan energi terbarukan seperti turbin angin. Pada turbin angin, terdapat bilah atau *blade rotor* yang memiliki fungsi sebagai komponen pertama yang langsung berinteraksi dengan angin sebelum dikonversi menjadi energi mekanik. Turbin angin ini dirancang agar dapat menghasilkan daya pada kecepatan angin tertentu dan juga agar mempunyai kecepatan awal untuk memutar bilah untuk memproduksi listrik serendah mungkin sehingga dapat menghasilkan listrik pada kecepatan angin rendah. (Nuraini et al., 2019)

Menurut (Simamora et al., 2019), berdasarkan penelitiannya ditemukan bahwa kecepatan angin yang dapat dimanfaatkan yaitu pada pukul 08.00 sampai dengan 18.00, dengan kecepatan angin rata-rata dari 2 sampai dengan 4 m/s dan kecepatan angin maksimum sebesar 11,8 m/s. Kemudian, rata-rata energi angin yang dapat dihasilkan adalah 60,14 sampai dengan 77,59 W per jam. Lalu, berdasarkan pengukuran kecepatan angin secara langsung, rata-rata jumlah energi listrik yang dihasilkan dalam satu hari adalah 392,22 sampai dengan 499,18 Wh dengan menggunakan 1 buah kincir angin.

Terdapat dua jenis turbin angin yang umumnya digunakan untuk menghasilkan listrik dari energi angin yaitu HAWT & VAWT, karena kedua jenis turbin ini berperan penting dalam menghasilkan koefisien daya yang lebih tinggi. Turbin angin ini juga harus dirancang sedemikian rupa agar dapat memberikan gaya angkat yang efisien dan gaya drag minimum pada kecepatan angin rendah, dan turbin angin aerodinamis yang optimal ini dapat dipengaruhi oleh berbagai macam kriteria *chord*, *twist*, *angle of attack*, dan *pitch angle*.

Lalu dalam penelitiannya juga dilakukan perbandingan untuk menganalisis aerodinamis menggunakan *software* Qblade. *Airfoil* yang digunakan seperti viz Aquila, BW-3, E387, FX63-137, NACA 0012, NACA LS-0413, RG-15, S1223, SD 7080 dan SG6043. *Airfoil* tersebut dibandingkan untuk menganalisis nilai Cl , nilai Cl/Cd , dengan *angle of attack* yang berbeda. Hasilnya *airfoil* SD 7080 terpilih

sebagai *airfoil* terbaik karena lebar dan memiliki nilai Cl/Cd maksimal 46,30 dan untuk *angle of attack* pada 5° .

Dari hasil penelitiannya menunjukkan bahwa *airfoil* SD 7080 memiliki koefisien daya yang optimal pada C_p sebesar 34% pada *Tip Speed Ratio* 6 untuk bilangan reynolds (Re) 81.712. Setelah dianalisis lebih lanjut menggunakan Re yang berbeda-beda seperti 30.642, 40.856, 51.070, 61.284, 71.498, dan 81.712. koefisien daya maksimal sebesar 29% dihasilkan pada Re 40856 dengan *Tip Speed Ratio* 5-6. (Suresh dan Rajakumar, 2019)

Jumlah sudu (*blade*) pada sebuah turbin angin bervariasi dan dapat mempengaruhi kinerja dari turbin angin tersebut. Penggunaan jumlah sudu tergantung dari keadaan lingkungan/sistem kerja dari turbin dan penggunaan dari turbin tersebut, seperti pada daerah kecepatan angin rendah biasanya menggunakan tiga sudu karena sudu tersebut dapat menangkap energi angin lebih efektif dari jumlah sudu yang lebih sedikit. Maka dapat disimpulkan bahwa jumlah sudu bisa mempengaruhi kinerja turbin angin. (Syahyuniar et al., 2018)

Blade merupakan bagian utama yang berinteraksi langsung dengan angin maka dalam sebuah *blade* perlu diperhatikan C_p dan TSR. C_p adalah tingkat efisiensi dari suatu *blade rotor*, semakin besar efisiensinya maka semakin besar kemampuan suatu turbin untuk menyerap energi angin. kemudian TSR merupakan perbandingan kecepatan ujung *blade rotor* terhadap angin, maka semakin besar TSR akan semakin besar juga putarannya. (Rachman et al., 2019)

Studi penelitian *Horizontal Axis Wind Turbine* yang dilakukan oleh (Madi et al., 2021) menggunakan *airfoil* berjenis Clark-Y, NACA 4412, NACA 3612, NACA 4418, NACA 0012, dan NACA 0018 dengan menggunakan bilah berjenis *taper*. Hasil yang diperoleh dari bilah-bilah tersebut untuk menyerap energi angin dengan nilai paling kecil diperoleh oleh Clark-Y sebesar 39%, sedangkan yang paling besar adalah NACA 4412 sebesar 52%.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Energi angin

Energi angin sudah lama dikenal dan dimanfaatkan oleh manusia. Energi angin memiliki energi kinetik yang dapat diubah menjadi sumber daya energi yang murah. Teknologi konversi dari energi kinetik angin menjadi listrik saat ini masih mahal. Secara teoritis, pada dasarnya angin terjadi dikarenakan adanya perbedaan temperatur udara, panas dan dingin. Hingga saat ini sudah terdapat 25 negara yang memanfaatkan teknologi tenaga angin dan hampir semuanya negara-negara beriklim tropis, seperti Indonesia. Energi angin ini merupakan energi yang berasal dari tenaga kinetik angin untuk menghasilkan tenaga mekanik. Tenaga ini dikonversikan lebih lanjut menjadi energi listrik dengan bantuan generator. Angin merupakan udara yang bergerak dikarenakan adanya perbedaan tekanan seperti berpindah dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan lebih rendah.

Mesin energi angin yang dinamakan turbin angin, menggunakan energi kinetik dari angin dan mengkonversinya menjadi energi mekanis atau listrik yang bisa digunakan untuk berbagai tujuan. Turbin angin ini menggunakan gerakan rotasi untuk membangkitkan listrik atau menjalankan peralatan mesin untuk memanfaatkan energi kinetik dari angin dan mengonversinya menjadi energi listrik. Adapun kekurangan dari energi ini adalah:

1. Memerlukan sumber angin yang cukup
2. Penyebaran angin yang tidak merata bisa menyebabkan produksi energi yang tidak konsisten
3. Biaya modal yang tinggi
4. Bising (Silitonga dan Ibrahim, 2020)

Untuk menemukan daya angin pada sebuah energi angin dapat menggunakan persamaan 2.1 berikut:

$$Pa = \frac{pl}{K} \quad (2.1)$$

Dimana:

Pa = Daya energi angin persatuan waktu (watt)

pl = Daya listrik yang ingin dihasilkan oleh turbin angin (watt)

K = efisiensi sistem turbin angin (Alfaridzi dan Setiawan, 2020)

2.2.2 Konsep turbin angin skala mikro dan klasifikasinya

Turbin angin memiliki daya *output* yang berkisar dari beberapa wat sampai dengan 10 MW. Standar keamanan IEC untuk turbin angin skala kecil atau mikro yaitu IEC 61400-2, mendefinisikan turbin angin skala kecil tersebut memiliki luas sapuan rotor kurang dari 200 m², dimana $P < 50$ kW. Secara umum, prinsip dari turbin angin skala kecil ini memiliki prinsip yang sama dengan turbin angin skala lainnya (Wood, 2011).

Turbin angin juga sudah digunakan dari dahulu dalam beberapa cara, seperti berlayar, kincir angin dan turbin angin, dan lain-lainnya. Pada masa kini, turbin angin digunakan sebagai alat konversi energi yang mengubah energi angin menjadi energi mekanik dan mengubahnya menjadi energi listrik. Energi angin merupakan energi kinetik yang bertebaran diudara. Jumlah energi kinetik angin yang tersedia bergantung pada 2 faktor, yaitu massa udara dan kecepatan angin. Umumnya turbin angin dapat diklasifikasikan dengan sumbu rotasinya, seperti Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) dan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV).

TASH adalah turbin dengan sumbu yang rotasinya secara horintal atau mendekati horizontal dari tanah dan hampir paralel dengan arah angin. kebanyakan dari turbin angin komersial yang digunakan ialah berjenis TASH. Pada gambar 2 - 1 menunjukkan gambar turbin angin sumbu horizontal. Termasuk yang paling umum dilihat yaitu *propeller turbines*, yang merupakan jenis *lift* yang berkerja berdasarkan daya angkat pada bilah-bilah kincir. Tidak seperti bilah dengan sumbu vertikal (TASV), TASH lebih disukai dalam pembangkit listrik dikarenakan memiliki efisiensi konversi energi yang relatif lebih tinggi.

Berikut beberapa kelebihan daru TASH:

1. TASH merupakan salah satu yang paling stabil dan sudah diaplikasikan secara komersial dalam desain turbin angin.
2. TASH memproduksi daya listrik dari tarikan yang relatif rendah dan melibatkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi.
3. Mungkin untuk menggunakannya pada ketinggian yang lebih tinggi.

4. TASH berjalan lebih baik dibawah fluktuasi kecepatan angin karena sudut kontrol serangan yang lebih baik.

Berikut kekurangan dari TASH:

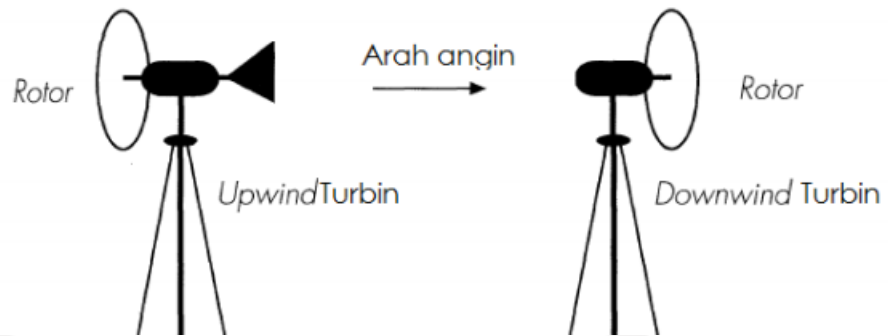
1. TASH membutuhkan *yaw drives* untuk mengarahkan turbin kearah angin datang.
2. Struktur yang kuat dibutuhkan untuk *generator* dan *gearbox* yang berat.
3. Biaya pemasangan dan perawatan lebih besar sesuai ketinggian tower.

Sebaliknya, jika poros turbin angin bersumbu vertikal ke tanah dan hampir tegak lurus kearah angin, turbin itu diklasifikasikan sebagai TASV. Berikut kelebihan dari TASV:

1. TASV tidak sensitif terhadap arah angin, sehingga tidak perlu kontrol yaw.
2. Kebutuhan struktural tidak dibutuhkan.
3. Perawatan lebih mudah dilakukan karena turbin dipermukaan tanah.
4. *Pitch control* tidak dibutuhkan untuk TASV.

Akan tetapi, TASV tidak begitu populer secara komersial dikarenakan beberapa kerugian besar sebagai berikut.

1. Umumnya, TASV tidak bisa memulai sendiri. Oleh karena itu diperlukan tambahan motor yang dibutuhkan.
2. TASH lebih dekat dengan tanah, dimana kecepatan angin lebih rendah daripada ketinggian yang lebih tinggi.
3. Efisiensi terbatas karena bilah harus melewati zona aerodinamis pada zona mati dalam siklus lengkapnya.
4. *Guy wires* bisa dibutuhkan untuk membantu struktur, dan dapat menyebabkan ketidaknyamanan saat pemasangan dan perawatan. (Dan Zhao et al., 2019)



Gambar 2 - 1 Turbin angin TASH jenis *upwind* dan *downwind*

(Sumber: buku *windpower workshop*)

Sebuah sistem turbin angin memiliki efisiensi tersendiri untuk sistem yang dimilikinya, dikarenakan tiap masing-masing komponennya memiliki efisiensi yang berbeda-beda. Untuk mengetahui efisiensi dari sistem turbin angin, maka dapat diketahui dengan persamaan 2.2 berikut:

$$K = \eta_b \times \eta_g \times \eta_t \times \eta_k \quad (2.2)$$

Dimana:

K = efisiensi sistem untuk turbin angin

η_b = efisiensi bilah yang digunakan pada turbin angin

η_g = efisiensi generator yang digunakan pada turbin angin

η_t = efisiensi transmisi yang digunakan pada turbin angin

η_k = efisiensi kontroller yang digunakan pada turbin angin (Nuraini et al., 2019)

Blade atau yang umumnya disebut bilah merupakan alat untuk mengonversi energi angin. Energi angin yang memutar bilah pada baling-baling akan diteruskan untuk memutar *shaft* yang menghubungkan ke generator sehingga dapat menghasilkan listrik. Dalam implementasinya, beberapa jenis bilah yang umumnya digunakan yaitu:

1. *Taper*

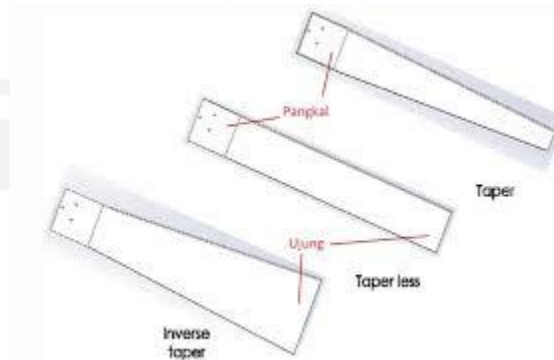
Bilah jenis ini memiliki karakteristik yang mengecil ke ujungnya.

2. *Taper less*

Bilah jenis ini memiliki karakteristik yang cenderung memiliki lebar yang sama sampai keujung bilahnya.

3. *Inverse taper*

Bilah jenis ini memiliki karakteristik yang membesar keujungnya. Keseluruhan jenis bilah ini dapat dilihat pada gambar 2 – 2 dibawah ini (Simamora et al., 2019).

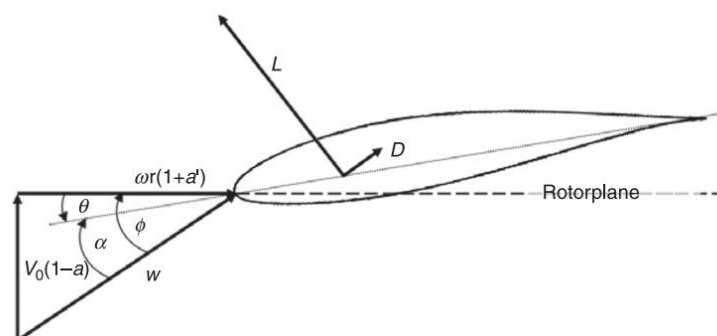


Gambar 2 - 2 Karakteristik bilah
(Sumber: Lentera Bumi Nusantara)

2.2.3 Desain *blade*

Dalam mendesain sebuah *blade*, ada beberapa hal yang perlu diketahui sebelum melakukan pendesainan tersebut, antara lain:

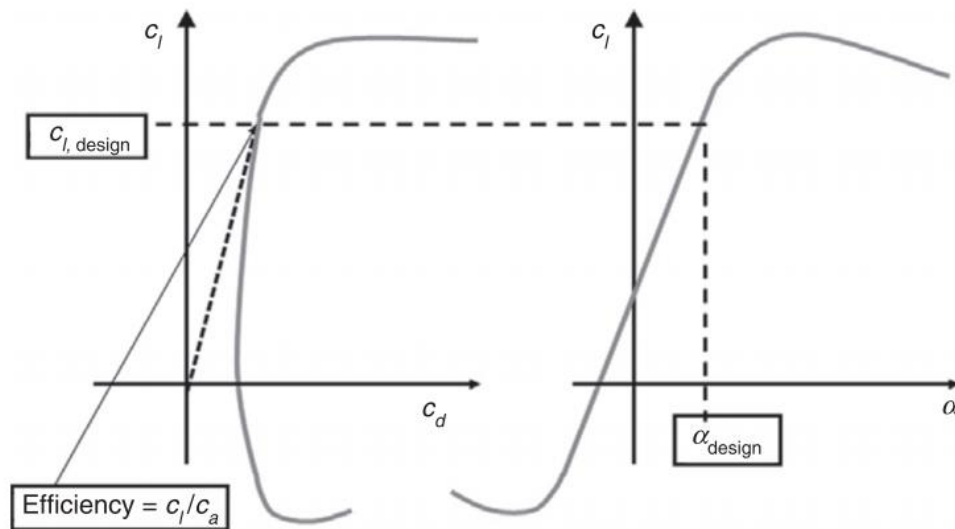
A. *Airfoil*



Gambar 2 - 3 Sketsa 2d airfoil
(Sumber: Buku *wind energy systems*)

Parameter yang paling penting dalam mendesain sebuah *blade rotor* yang aerodinamis adalah koefisien gaya didalam bidang rotor dan diluar bidang rotor. Pada gambar 2 – 3 diatas, dapat dilihat bahwa arah dari gaya angkat (*lift*) dan gaya hambat (*drag*) yang merupakan turunan dari koefisien pada bidang rotor. *Lift* selalu

normal untuk aliran yang akan masuk sedangkan *drag* selalu dalam arah sepanjang aliran.



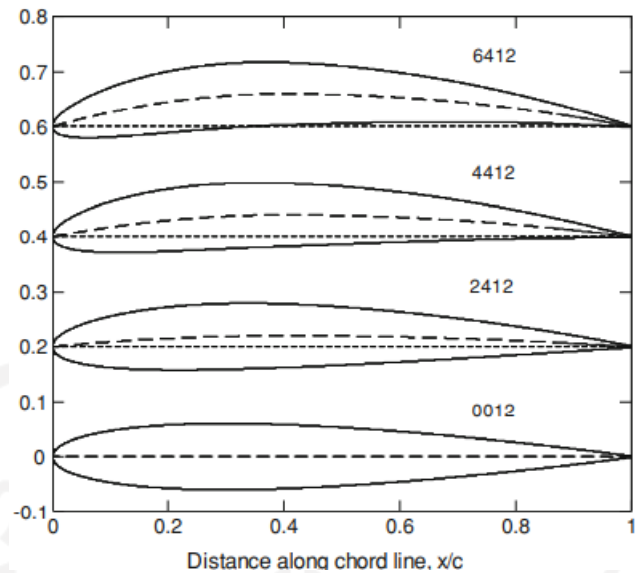
Gambar 2 - 4 Sketsa karakteristik *airfoil* dengan *Cl*, *Cd* dan α

(Sumber: Buku *wind energy systems*)

Gambar 2 – 4 diatas, menunjukkan karakteristik sebuah *airfoil*. disebelah kanan merupakan koefisien *lift* (*Cl*) terhadap *angle of attack* (α) dan disebelah kiri merupakan *Cl* terhadap koefisien *drag* (*Cd*). Untuk α rendah dan *Cl*, *Cd* rendah memiliki nilai cukup konstan dan sesuai aliran sekitar *airfoil* terutama melekat pada permukaannya. Untuk nilai α tinggi dan *Cl*, *Cd* mendekati maksimal, yang mencerminkan awal dari perpecahan biasanya berasal dari *trailing edge*.

Namun, karakteristik *airfoil* *Cl* dan *Cd* tidak bisa ditetapkan sebagai daya yang tetap, melainkan bergantung pada tiga parameter yaitu:

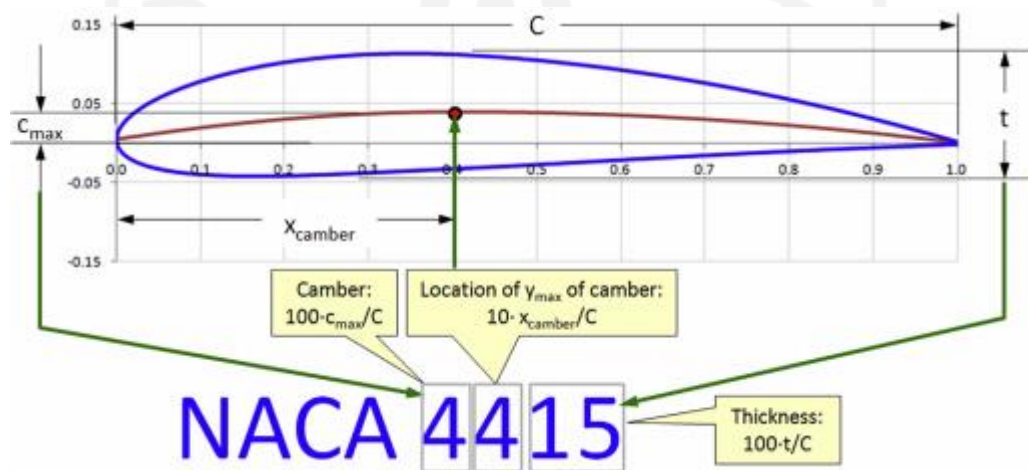
1. Bilangan reynolds
2. Kekasaran tepi depan *airfoil*
3. Ketebalan relatif *airfoil* (C. Bak, 2011)



Gambar 2 - 5 Contoh airfoil 4-digit

(Sumber: Buku *wind small turbine*)

Pada gambar 2 – 5 diatas menunjukkan *airfoil* jenis NACA (*National Advisory Committee on Aeronautics*) dengan seri 4-digit memiliki kelebihan yang dideskripsikan secara analitis, meskipun kebanyakan dari *airfoil* modern di spesifikan lagi dengan permukaan kordinatnya. *airfoil* 4-digit ini mengilustrasikan terminologi dasar dari *airfoil* yang dimana meningkat secara manual dari tata letak sayap dan bilah propeler yang digunakan di industri pesawat masa kini (Wood, 2011).



Gambar 2 - 6 Anatomi airfoil NACA 4-digit

Gambar 2 – 6 diatas menunjukkan anatomi dari sebuah *airfoil* NACA dengan seri 4-digit dengan nomor seri NACA 4415. *Airfoil* tersebut memiliki

deskripsi 4 % *Chamber* yang terletak di 40 % panjang *chord* keseluruhan dan *thickness* 15% (Gudmundsson, 2014).

B. Bilangan reynolds

Bilangan Reynolds (*Re*) merupakan parameter skala dan pada dasarnya dapat memberikan perbandingan kekuatan mekanis dalam suatu aliran (terkait dengan kecepatan dan massa atau kepadatan dari cairan tersebut) dan kekuatan kental (viskositas). Hal ini dapat didefinisikan pada persamaan 2.3 berikut ini:

$$Re = \frac{\rho x V x c}{\mu} = \frac{V l}{\nu} \quad (2.3)$$

Dimana:

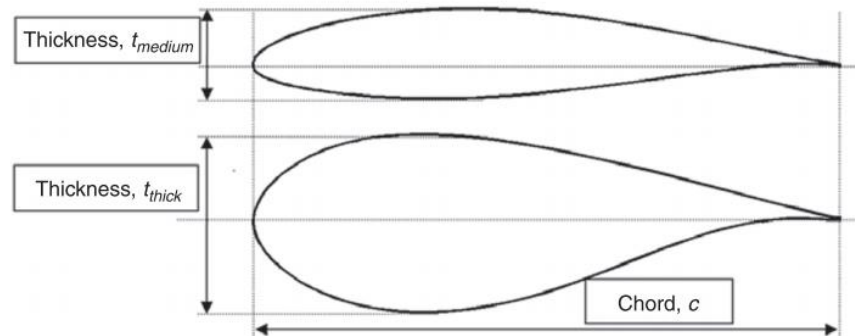
- Re* = Bilangan Reynolds
- V* = kecepatan uji angin yang digunakan (m/s)
- ρ = kerapatan udara (kg/m³)
- C* = chord bilah yang digunakan (m)
- μ = viskositas dinamis cairan ((Ns/m²)
- v* = viskositas kinematik (m²/s)
- l* = panjang karakter, panjang chord suatu *airfoil* (m)

dengan bertambahnya jumlah bilangan reynolds (*Re*) maka lapisan *boundary* juga semakin menipis, yang artinya dapat mengakibatkan hambatan yang lebih rendah. Meningkatkan bilangan reynolds juga memiliki efek destabilisasi pada lapisan *boundary*, yang dalam hasilnya lokasi transisi bergerak menuju *leading edge*, mengarah ke *turbulent boundary layer* diatas bagian yang lebih panjang dari permukaan *airfoil*. efek bersihnya dari peningkatan bilangan reynolds ini adalah tarikannya lebih rendah tapi memiliki hambatan yang rendah dari *angle of attack* (W. A. Timmer dan C. Bak, 2013).

C. ketebalan relatif *airfoil*

Disebabkan oleh tingginya muatan dari *blade* kearah *tip* atau ujung, bagian akar atau *root* dari *blade* mmebutuhkan kekuatan yang besar. Kekuatan ini dapat diperoleh dengan meningkatkan jarak antara bagian bawah dan atas *airfoil* seperti pada gambar 2 – 6 dibawah ini. Perbandingan antar jarak ini (ketebalan) dan panjang *chord* adalah ketebalan relatif. Oleh karena itu, untuk meningkatkan

ketebalan *blade* tanpa menambahkan panjang dari *chord* membutuhkan ketebalan relatif yang besar. Namun, hal ini bergantung pada evaluasi struktural *blade* itu sendiri.



Gambar 2 - 7 Perbedaan ketebalan pada *airfoil*

(Sumber: buku *wind energy systems*)

D. pemilihan *airfoil*

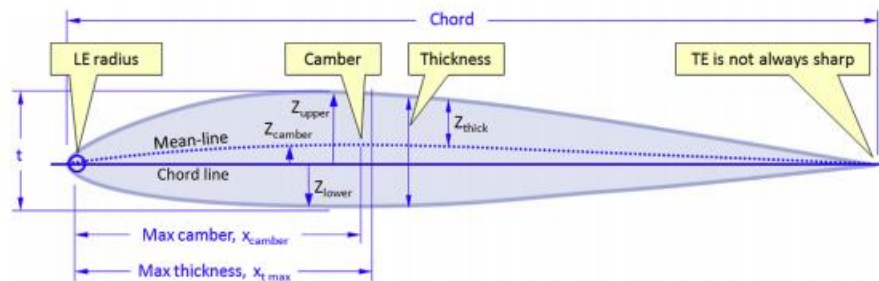
airfoil sangat dibutuhkan dalam mendesain sebuah *blade rotor*, karakteristik *airfoil* yang dibutuhkan meliputi:

1. *Maximum lift* (Cl_{max})
2. *Lift-drag ratio* (Cl/Cd)
3. *Lift value* dimana *lift-drag* maksimal rasio ditemukan, dapat disebut desain *lift*. (Cl_{design}).

Pemilihan *airfoil* bergantung pada filosofi desain rotor. Pemilihan tersebut harus diputuskan apakah *blade* tersebut harus ramping apa lebar. Untuk *blade* yang ramping membutuhkan TSR yang tinggi, desain *lift* yang tinggi dan/atau membutuhkan jumlah *blade* yang besar. Sedangkan untuk jenis yang lebar membutuhkan desain TSR yang rendah, desain *lift* rendah dan/atau sedikit jumlah *blade*. Secara potensialnya, *airfoil* ramping dapat memastikan beban yang ringan dan berat, tetapi dalam strukturnya tidak akan bagus karena ketebalan *blade* berkurang untuk mengurangi panjang *chord* dan nilai konstan ketebalan relatif. Di sisi lain, *airfoil* lebar dapat menjamin kekuatan struktur lebih tinggi, akan tetapi beban yang tinggi dan berat menjadi hasil potensinya. Dalam memutuskan apakah *blade* tersebut harus ramping apa lebar bergantung pada rancangan struktur dan konsep dari turbin angin tersebut (C. Bak, 2011).

E. *Thickness, Mean line dan Chamber.*

Pada bagian ini akan menjelaskan geometri pada *airfoil* yang umumnya digunakan oleh pedesain. Gambar 2 – 7 dibawah ini menunjukkan geometri umum dari sebuah *airfoil* konvensional yang digunakan oleh pada pendesain.



Gambar 2 - 8 Geometri *airfoil* konvensional

(Sumber: Buku *general aircraft aviation design*)

NACA mendefinisikan sebuah *airfoil* berdasarkan pada ketebalan (*thickness*) dan garis tengah (*mean line*). *Chamber* didefinisi sebagai jarak maksimum antara *mean line* dengan *chordline*. *Chamber* sangat berpengaruh karena semakin besar *chamber* maka semakin besar juga gaya angkat (*lift*) yang akan dihasilkan dan semakin tebal *thickness* maka semakin besar juga *stall*, *angle of attack*, dan gaya hambat (*drag*). Tetapi ada juga pengecualian, umumnya semakin besar *chamber* semakin besar juga gaya hambatnya (Gudmundsson, 2014).

2.2.4 Panjang bilah

Panjang bilah (R) atau jari-jari bilah merupakan parameter perancangan yang dapat mempengaruhi daya yang akan dihasilkan karena panjang *blade rotor* ini akan menentukan luas sapuan bilah. luas sapuan bilah dapat ditemukan dengan menggunakan persamaan 2.4 berikut ini:

$$A = \frac{2p_a}{\rho \times v_{maks}^3} \quad (2.4)$$

Dimana:

- A = Luas Sapuan *blade rotor* (m^2)
- p_a = Daya energi persatuan waktu (watt)
- v_{maks} = Kecepatan angin maksimal (m/s)
- ρ = kerapatan udara (kg/m^3)

Dari persamaan (2.4) diatas, didapatkan persamaan untuk mencari panjang atau jari-jari bilah (R) dengan menggunakan persamaan 2.5 berikut ini:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2.5)$$

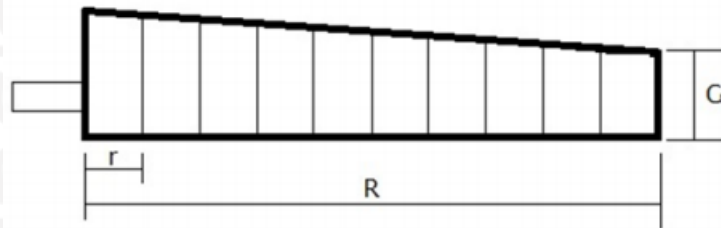
Dimana:

R = Jari-jari *blade rotor* (m)

A = Luas Sapuan *blade rotor* (m²) (Nuraini et al., 2019)

2.2.5 Geometri bilah

A. Jari-jari parsial bilah



Gambar 2 - 9 Geometri *blade rotor*

(Sumber: Lentera Bumi Nusantara)

Gambar 2 – 8 diatas, merupakan gambaran dari geometri suatu bilah yang menunjukkan bahwa tiap satu bilah memiliki jari-jari tiap elemennya. Jari-jari tiap elemen disebut jari-jari parsial. Untuk menemukan jari-jari parsial tiap elemen dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2.6 berikut:

$$r_{\text{parsial ke-}} = 0,17 + \left[\left(\frac{R-0,17}{n} \right) x(\text{elemen}) \right] \quad (2.6)$$

Dimana:

n = jumlah elemen yang digunakan.

r = jari-jari parsial elemen yang akan dicari (m) (Nuraini et al., 2019)

B. *Tip Speed Ratio*

Tip Speed Ratio atau yang biasa disingkat TSR didefinisikan sebagai hubungan antara bilah dengan kecepatan angin relatif. TSR yang lebih tinggi membuat lebar *chord* pada bilah menjadi lebih sempit. Hal ini dapat

mengakibatkan berkurangnya pemakaian material dan biaya produksi yang lebih rendah. Meskipun demikian, peningkatan gaya sentrifugal dan gaya aerodinamis saling berhubungan dengan TSR yang tinggi. Peningkatan gaya ini menandakan bahwa kesulitan untuk mempertahankan integritas struktural dan mencegah kegagalan *blade* tersebut. Karena kecepatan pada ujung dapat meningkatkan aerodinamis, maka desain *blade* menjadi semakin kritis. Sebuah *blade* dirancang untuk kecepatan relatif angin yang tinggi maka dikembangkan torsi minimal untuk kecepatan rendah. TASH modern pada umumnya menggunakan TSR 9 sampai 10 untuk rotor dengan 2 bilah dan TSR 6 sampai 9 untuk rotor dengan 3 bilah. TSR tersebut telah digunakan untuk menghasilkan konversi energi kinetik angin yang efisien menjadi tenaga listrik (Schubel dan Crossley, 2012).

Dalam sebuah geometri bilah, TSR juga memiliki TSR parsial pada setiap elemennya. TSR parsial (λr) merupakan perbandingan kecepatan linear elemen *blade rotor* terhadap kecepatan angin pada elemen yang berbeda-beda. Untuk mencari TSR parsial tiap-tiap elemen dapat menggunakan persamaan 2.7 berikut ini:

$$\lambda r = \frac{r}{R} \lambda R \quad (2.7)$$

Dimana:

λR = *Tip Speed Ratio* bilah

R = jari-jari bilah (m)

r = jari-jari parsial bilah pada elemen yang ingin dicari (m)

λr = *Tip Speed Ratio* parsial pada elemen yang ingin dicari (Nuraini et al., 2019)

C. **Chord bilah**

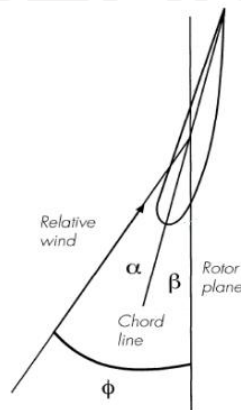
Pada geometri bilah terdapat *Chord* (Cr) atau yang lebih dikenal sebagai lebar bilah. Untuk mencari lebar dari suatu bilah dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2.8 berikut ini:

$$Cr = \frac{(16\pi \times R \times \left(\frac{R}{r}\right))}{9 \times \lambda R^2 \times B \times Cl} \quad (2.8)$$

Dimana:

- R = Jari-jari *blade rotor* (m)
- r = jari-jari parsial elemen yang akan dicari (m)
- λR = *Tip Speed Ratio*
- B = Jumlah sudu yang digunakan
- Cl = koefisien lift penampang *airfoil*
- Cr = panjang *chord* (m) (Nuraini et al., 2019)

2.2.6 Sudut aerodinamis pada penampang *airfoil*



Gambar 2 - 10 *Setting angle* pada *airfoil*

(Sumber: Lentera Bumi Nusantara)

Pada gambar 2 – 9 diatas, menunjukkan sudut-sudut pada sebuah penampang *airfoil*. Sudut-sudut tersebut antara lain *flow angle* (ϕ), *angle of attack* (α), dan *twist* (β) ditambah *stall*. Sudut-sudut tersebut merupakan sudut-sudut utama gaya aerodinamis pada sebuah *blade* meskipun desainnya juga harus mengatasi masalah turbulensi. Daya angkat atau *lift* merupakan gaya aerodinamis yang memiliki arah tegak lurus ke arah angin. Gaya hambat atau *drag* merupakan gaya aerodinamis yang diberikan pada sebuah *airfoil* yang cenderung mengurangi pergerakan *forward momentu* atau gerakan depannya. Kemudian *stall* merupakan suatu kondisi dimana *airfoil* kehilangan gaya angkatnya karena perubahan sudut serangan atau *angle of attack*.

Istilah *lift* dan *drag* kadang digunakan dalam racangan sebuah turbin angin. sebuah turbin angin berporos horizontal atau TASH, dimana sumbu rotasi sejajar dengan aliran angin juga dapat disebut sebagai mesin angkat. Meskipun terdapat

drag juga dalam desain ini, *lift* merupakan gaya utama yang menggerakkan *blade* tersebut (Salameh, 2014).

A. *Flow angle* (ϕ)

Flow angle dapat diketahui saat memprediksi faktor interferensi, untuk menemukan sudut *flow angle* pada suatu penampang *airfoil* adalah dengan persamaan berikut:

$$\lambda r = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha' \tan \phi} \frac{1}{\tan \phi}$$

Hasilnya adalah sebagai berikut:

$$\lambda r = \frac{\sin \phi (2 \cos \phi - 1)}{(1 - \cos \phi)(2 \cos \phi + 1)}$$

Rumus ini dapat disederhanakan menjadi:

$$\lambda r = \frac{1}{\tan \frac{3}{2} \phi}$$

Sehingga untuk mencari *flow angle* dapat menggunakan persamaan 2.9 berikut ini:

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda r} \quad (2.9)$$

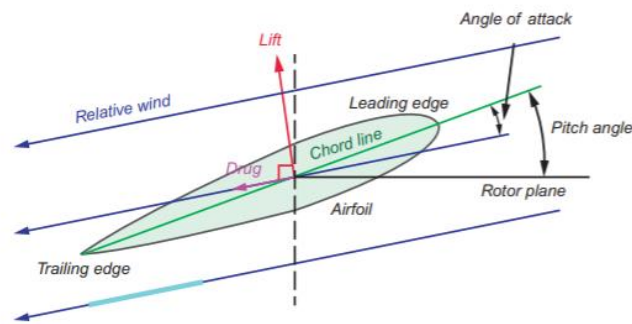
Dimana:

λr = *Tip Speed Ratio* parsial pada elemen yang ingin dicari

ϕ = *Flow angle* ($^{\circ}$) (Ikuyama, 2013)

B. *Angle of attack* (α)

Angle of attack atau sudut serang adalah sudut dari aliran yang datang terhadap *chord line*, dan semua nilai *Cl* dan *Cd* relatif terhadap sudut ini (Schubel dan Crossley, 2012).



Gambar 2 - 11 Gaya dan sudut serang pada sebuah propeller blade

(Sumber: Buku *renewable energy system design*)

Pada gambar 2 – 10 menunjukkan sebuah penampang *airfoil* biasa dan gaya yang terjadi pada *airfoil* tersebut. Dalam kasus ini, terdapat gaya dorong pada penampang *airfoil*. Gaya angkat yang dihasilkan tegak lurus terhadap *angle of attack*. Gaya angkat ini terjadi karena terdapat aliran udara yang melewati permukaan penampang *airfoil* bagian atas menempuh jarak yang lebih jauh dibanding bagian bawah *airfoil* tersebut. Oleh karena itu, udara diatas melaju dengan kecepatan lebih tinggi sehingga menyebabkan tekanan udara dibagian atas penampang *airfoil* lebih rendah, sehingga terjadi gaya angkat. Sedangkan gaya hambat adalah gaya *frictional* yang diberikan pada *airfoil* (Salameh, 2014).

C. Sudut puntir/twist (β)

Dari gambar 2 – 9, *setting of angle/twist* (β) merupakan sudut antara *chord line* dan bidang rotasi dari motor. Untuk mencari nilai dari *twist* dapat menggunakan persamaan 2.10 berikut ini:

$$\beta = \phi - \alpha \quad (2.10)$$

Dimana:

β = sudut puntir / *twist* ($^{\circ}$)

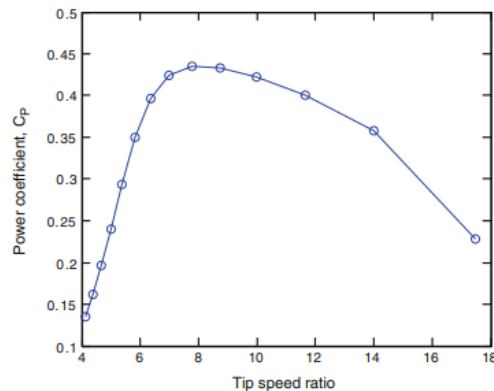
ϕ = *Flow angle* ($^{\circ}$)

α = *angle of attack* ($^{\circ}$) (Ikuyama, 2013)

2.2.7 Wind power parameter

Pada mesin fluida lainnya, umumnya digunakan untuk membahas operasi turbin angin dalam hal pengelompokan parameter yang dapat diperoleh dari

analisis dimensi. Rasio C_p dari daya yang sebenarnya dihasilkan untuk kekuatan dalam angin yang akan melewati baling-baling atau *blade rotor*.



Gambar 2 - 12 kurva C_p terhadap TSR pada Vestas V80

(Sumber: Buku *small wind turbines*)

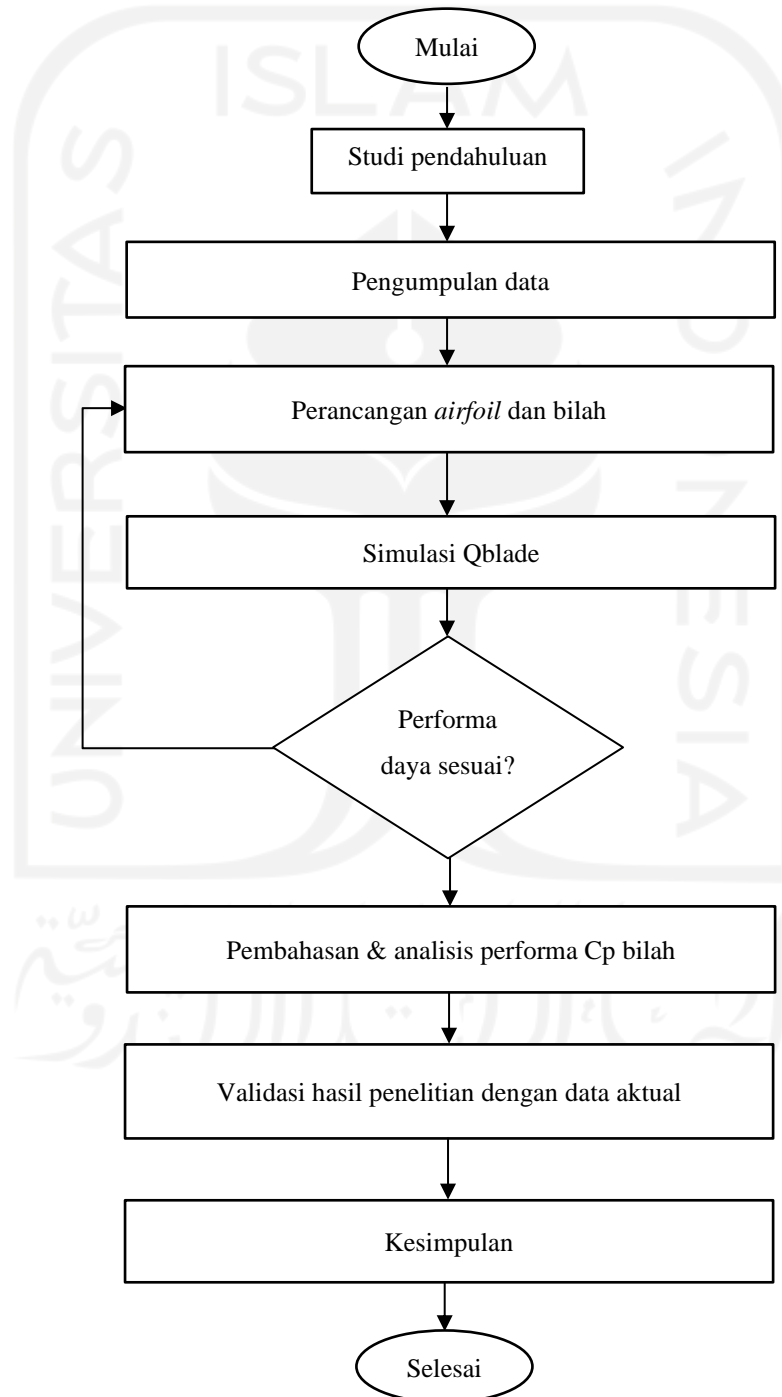
Pada gambar 2 – 10 menunjukkan bahwa TSR merupakan efek mayor dalam sebuah performa turbin angin. ini disebabkan kontrol *angle of attack* pada bilah. Karena nilai C_p dapat menentukan berapa banyak daya yang dapat diekstrak oleh kecepatan angin yang diberikan, gambar tersebut menyiratkan bahwa kecepatan konstan turbin tidak dapat beroperasi pada efisiensi maksimalnya dalam kecepatan angin yang besar.

Dapat dilihat pada gambar 2 – 11 menunjukkan bentuk umum dari performa kurva C_p terhadap TSR: saat TSR meningkat dari titik 0, C_p meningkat sampai titik maksimal saat nilai optimal dari TSR dan berkurang sampai ke 0 saat “*runaway*” poin dimana kecepatan sudut maksimal Pada Vesta V80 titik “*runaway*” berada pada sekitar 20. Tiap turbin yang kehilangan beban listriknya akan langsung melaju menuju titik “*runaway*” tersebut. Titik berbahaya adalah saat kecepatan angin cukup tinggi, gaya sentrifugal didalam blade akan memecahkan bilah tersebut. Gambar tersebut juga menunjukkan kenapa kecenderungan sekarang untuk turbin skala besar dan kecil dimana kecepatan angin tidak dapat diukur (Wood, 2011).

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Dibawah ini merupakan alur penelitian yang akan dilakukan dalam penelitian ini:



A. Studi pendahuluan

Tahap-tahapan dalam studi pendahuluan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Menentukan topik Tugas Akhir didapatkan cara membaca dari literatur-literatur yang ada seperti jurnal penelitian, berita, dll.
2. Membuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian.
3. Mengumpulkan jurnal-jurnal pendukung dan mencari teori-teori dasar yang akan digunakan.
4. Menentukan metodologi penelitian.

B. Pengumpulan data

Pengumpulan data-data berguna untuk mengumpulkan segala informasi/data yang berguna untuk membantu mempermudah proses penelitian. Data yang dikumpulkan berupa:

1. Sumber informasi atau sumber lainnya seperti jurnal penelitian yang dapat dikembangkan menjadi topik penelitian.
2. Teori dasar dan jurnal penelitian pendukung penelitian.
3. Jenis-jenis *airfoil* yang akan dibandingkan.
4. Data pembanding berupa data kecepatan angin maksimal dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) bertempat di Bandara YIA, Kab. Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta periode September 2019 dan Mei 2021.

C. Perancangan *airfoil* dan bilah

Perancangan pada penelitian ini berguna untuk membuat data-data rancangan seperti perhitungan untuk tiap-tiap jenis *airfoil* dan bilah yang memiliki output akhir berupa data jari-jari parsial, *chord*, dan *twist* yang dapat diinput kedalam perangkat lunak Qblade.

D. Simulasi Qblade

Simulasi dengan menggunakan perangkat lunak Qblade berguna untuk:

1. Mengetahui kinerja/performa masing-masing jenis *airfoil* dan jenis bilah yang dirancang.
2. Mengetahui perbandingan hasil dari rancangan tiap-tiap jenis *airfoil* dengan masing-masing jenis *rotor blade* dalam bentuk kurva *Coeffisien of Power* (C_p) terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR).

E. Hasil pembahasan dan analisis

Tahap-tahapan dalam pembahasan dan analisis dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membahas masing-masing kurva C_p terhadap TSR tiap masing-masing *airfoil* dengan jenis bilahnya.
2. Menganalisis masing-masing kurva C_p terhadap TSR tiap masing-masing bilah dan *airfoilnya*
3. Menentukan jenis bilah dengan *airfoil* yang mendapatkan performa terbaik dari kurva C_p terhadap TSR.

F. Validasi data penelitian dengan data aktual

Validasi data penelitian dengan menggunakan data aktual perlu dilakukan, karena validasi ini akan digunakan untuk mengetahui kebenaran dari data tersebut.

G. Kesimpulan

Kesimpulan dalam penelitian ini berguna untuk menjawab permasalahan dari tujuan dari penelitian ini.

3.2 Kriteria Desain

Adapun kriteria desain pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bilah dapat menyerap energi angin
Bilah yang dirancang dapat menyerap dan menghasilkan energi listrik dari energi angin yang melewati turbin tersebut.
2. Dapat beroperasi dengan parameter yang telah ditentukan

Bilah yang dirancang dapat beroperasi dan menghasilkan energi listrik dengan menggunakan parameter yang telah ditentukan yaitu kecepatan angin perancangan.

3.3 Peralatan penelitian

Peralatan penelitian terdiri dari peralatan dan perangkat pembantu yang digunakan pada penelitian ini.

3.3.1 Laptop

Laptop digunakan untuk mempermudah pengerjaan penelitian ini. Adapun spesifikasi yang digunakan oleh penulis yaitu:

<i>Operation System</i>	Windows 10 Home
<i>Processor</i>	Intel®
CPU	Core™ i7-8750H @2.20 GHz
VGA	NVIDIA GTX 1050 Ti
<i>Installed Memory (RAM)</i>	8 GB
<i>System Type</i>	64-Bit Operating System

3.3.2 Perangkat lunak Qblade V. 0.963

Qblade adalah perangkat lunak yang digunakan untuk simulasi *wind turbine* dan simulasi aerodinamik. Perangkat ini juga dapat digunakan untuk menentukan dan membandingkan jenis *airfoil* yang akan digunakan. Penulis menggunakan perangkat ini untuk membantu mengolah data hasil perancangan serta mensimulasikan hasil geometri bilah yang telah dirancang dalam perangkat ini.

3.4 Perancangan

Perancangan *blade* dengan turbin angin sumbu horizontal (TASH) hanya terdiri dari perancangan perangkat lunak. Tahapan perancangan perangkat lunak terdiri dari spesifikasi turbin angin yang digunakan dan tahapan perancangan dengan perangkat lunak dengan bantuan microsoft excel dan simulasi dengan

menggunakan Qblade V. 0.963. hal yang perlu diperhatikan saat melakukan perancangan awal yaitu mengetahui spesifikasi turbin angin yang digunakan.

3.4.1 Spesifikasi TSD-500 Di PT. Lentera Bumi Nusantara

Berdasarkan dari yang peneliti ketahui, spesifikasi yang digunakan pada turbin angin *The Sky Dancer* (TSD-500) ini antara lain:

1. *Turbine type* : *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT)
2. *Maximum output power* : 500 Watt
3. *Start up wind speed* : 2,5 m/s.
4. *Cut in wind speed* : 3 m/s.
5. *Survival Wind Speed* : 33 m/s.
6. *Generator type* : *3-phase permanent magnet (Cogging less technology)*
7. *Number of blades* : 3 blades
8. *Storage system* : 24 V
9. *Weight of turbine system* : 25 kg

3.4.2 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak pada penelitian ini dibagi menjadi 4 tahapan yaitu perancangan jari-jari bilah, pemilihan *airfoil*, perancangan geometri bilah dan simulasi bilah yang telah dirancang tersebut.

A. Perancangan jari-jari bilah

Bilah atau *blade* pada sebuah baling-baling atau *Blade rotor* dengan turbin angin sumbu horizontal memiliki 3 jenis yang umumnya digunakan yaitu jenis *inverse taper*, *taper less*, dan *taper*. Pada penelitian ini hanya akan merancang 2 jenis saja yaitu *taper* dan *taper less*. Kedua jenis bilah tersebut dapat dirancang apabila sudah memperoleh jari-jari bilah dan jenis *airfoil* yang akan digunakan untuk semua jenis bilah yang akan digunakan dalam perancangan tersebut.

Pada perancangan jari-jari bilah, hal yang dirancang awal adalah menemukan efisiensi sistem dengan menggunakan persamaan 2.2 dan daya angin yang dapat dihasilkan dari turbin angin dengan menggunakan persamaan 2.1 yang

digunakan sebagai acuan. Kemudian menentukan kecepatan angin yang digunakan. Setelah menentukan kecepatan angin yang digunakan, hal yang harus diketahui adalah luas sapuan dari baling-baling tersebut dengan menggunakan persamaan 2.4. Karena dengan didapatnya luas sapuan baling-baling dari turbin angin, maka dapat diketahui juga jari-jari bilah yang akan digunakan dengan menggunakan persamaan 2.5.

B. Pemilihan *airfoil*

Pemilihan *airfoil* dengan performa yang bagus, umumnya memiliki nilai Cl/Cd terhadap α dan nilai Cl terhadap α yang tinggi. Akan tetapi, pada penelitian ini akan mencari tahu pengaruh dari perbedaan *chamber* dan *thickness* pada sebuah penampang *airfoil* yang berbeda-beda, dan mengetahui performa terbaik dari beberapa *airfoil* tersebut untuk dibandingkan dari kurva Cp terhadap TSR.

Akan tetapi dalam merancang sebuah geometri bilah diperlukan nilai-nilai yang didapatkan dari kurva Cl/Cd terhadap α dan nilai Cl terhadap α yang didapat setelah menginput bilangan reynolds dengan menggunakan persamaan 2.3 yang digunakan pada penelitian ini.

C. Perancangan geometri bilah

Perancangan geometri bilah bertujuan untuk membuat perancangan dari sebuah bilah dengan menggunakan beberapa perhitungan yang dibutuhkan dalam mendesain sebuah bilah. Oleh karena itu, perancangan bilah ini tidak memerlukan merancang 1 set bilah atau 3 buah bilah melainkan hanya 1 buah bilah saja, karena 1 buah bilah sudah mewakili bilah yang lainnya untuk satu jenis bilah *taper*, dan *taper less*.

Pada perancangan geometri bilah ini sebuah bilah akan dibagi menjadi beberapa elemen, yang dimana perhitungan tersebut yang digunakan nanti akan menyesuaikan pada elemen yang akan dicari. Pada bagian perancangan geometri bilah ini akan merancang beberapa *airfoil* yang telah dipilih kedalam rancangan bilah dengan jenis, *taper*, dan *taper less*. Hal yang harus dilakukan pertama untuk masing-masing jenis bilah adalah menentukan bilah tersebut menjadi beberapa elemen. mencari jari-jari parsial dengan menggunakan persamaan 2.6 dan mencari

Tip Speed Ratio parsial tiap bilah dengan menggunakan persamaan 2.7. Setiap jenis memiliki beberapa langkah perhitungan awal yang sama.

Pada perancangan bilah jenis *taper less*, setelah menemukan jari-jari parsial dan *Tip Speed Ratio* parsial, selanjutnya mencari *flow angle* parsial dengan menggunakan persamaan 2.9, c_l parsial dengan menggunakan persamaan 2.8, α parsial, *twist* parsial dengan menggunakan persamaan 2.10 pada tiap elemen yang telah ditentukan. *Chord* dari bilah jenis *taper less* langsung ditetapkan diawal.

Pada perancangan jenis *taper* setelah menemukan jari-jari parsial dan *Tip Speed Ratio* parsial, selanjutnya mencari *flow angle* parsial dengan menggunakan persamaan 2.9, *twist* parsial dengan menggunakan persamaan 2.10, *chord* parsial dengan menggunakan persamaan 2.8.

D. Simulasi bilah dengan perangkat lunak Qblade

Simulasi bilah bertujuan untuk mengetahui kinerja dari suatu bilah yang telah dirancang menggunakan perangkat lunak Qblade V. 0.963. pada simulasi ini parameter yang akan diinput berupa jari-jari parsial, *chord* parsial dan *twist* parsial bilah-bilah yang telah dirancang kedalam perangkat lunak tersebut. Setelah dilakukan simulasi pada bilah-bilah yang telah dirancang, parameter akhir yang ingin dicari ialah seberapa besar bilah tersebut dapat menyerap tenaga angin yang melewati baling-baling atau *blade rotor* tersebut. Hal ini dapat disebut sebagai nilai *Coeffisien of Power* (C_p) dengan satuan persentase (%) yang di dapat dari kurva C_p terhadap TSR dari bilah tersebut.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil perancangan

Dibawah ini menunjukkan hasil dari perancangan perangkat lunak yang telah dilaksanakan pada penelitian ini. Dalam sub bab hasil perancangan ini hanya menampilkan salah satu jenis perancangan *airfoil* saja, karena untuk perancangan jenis *airfoil* lainnya juga memiliki langkah yang sama dengan perancangan yang akan ditampilkan. Oleh karena itu untuk data perancangan jenis *airfoil* lainnya akan dilampirkan pada bagian lampiran tugas akhir ini.

4.1.1 Perancangan jari-jari bilah

Sebelum melakukan perancangan untuk mencari jari-jari bilah yang digunakan, peneliti harus mengetahui terlebih dahulu spesifikasi turbin angin yang digunakan pada pltb PT. Lentera Bumi Nusantara atau dapat dilihat pada sub bab 3.3.1. setelah mengetahui spesifikasi turbin angin tersebut langkah selanjutnya ialah mengetahui efisiensi sistem dari turbin angin yang digunakan. Tiap masing-masing komponen memiliki efisiensinya sendiri. Untuk efisiensi bilah menggunakan efisiensi sebesar 0,4, efisiensi generator digunakan 0,9, efisiensi transmisi digunakan 1,0, dan efisiensi kontroler digunakan 0,9. Lalu untuk mencari efisiensi dari sistem (K) tersebut dapat diketahui dengan menggunakan persamaan 2.2. Dengan persamaan 2.5 tersebut maka dapat diketahui bahwa besaran efisiensi sistem (K) dari turbin angin yang digunakan ialah 0,324. Dengan mempunyai data berupa daya listrik yang ingin dihasilkan (P_i) sebesar 500-watt dari sub bab 3.4.1, maka dapat diketahui juga besar daya angin yang akan dihasilkan oleh turbin angin yang digunakan dengan menggunakan persamaan 2.1. Dari persamaan tersebut maka dapat diketahui besaran daya angin yang akan dihasilkan oleh turbin angin tersebut berjumlah 1543,21 watt.

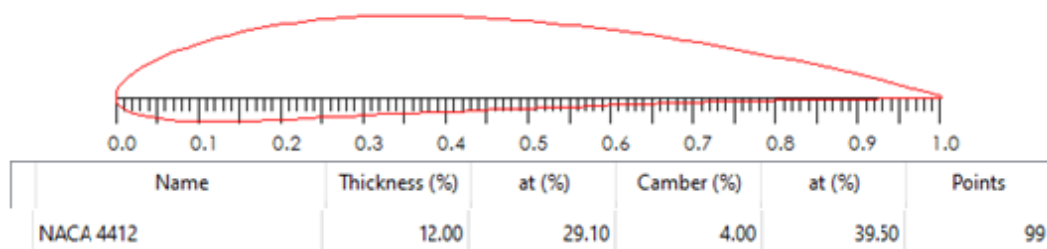
Dalam melakukan perancangan jari-jari sebuah bilah, perlu diketahui massa jenis dari udara atau kerapatan udara dan kecepatan angin maksimal yang akan digunakan pada penelitian ini. tujuannya adalah untuk mengetahui besar luas

sapuan dari bilah ini saat beroperasi dalam m^2 . Massa jenis udara yang digunakan adalah $1,225 \text{ kg/m}^3$ yang merupakan ketetapan untuk daerah dengan ketinggian dari 0 sampai dengan 1000 meter (Wood, 2011) dan kecepatan udara maksimal untuk didaerah Kab. Tasikmalaya $11,8 \text{ m/s}$. (Redno Pebrina Simamora et al., 2019). Maka untuk mendapatkan besar luas sapuan dari bilah (A) yang akan dirancang dapat diketahui dengan menggunakan persamaan 2.4 dan besar luas sapuan area bilah tersebut sebesar $1,53 \text{ m}^2$.

Luas sapuan ini berupa luas area dari si bilah untuk menyapu angin yang datang kearah bilah tersebut. setelah mengetahui luas sapuan area dari bilah (A) maka dapat diketahui juga jari-jari yang akan digunakan untuk perancangan penelitian ini, yaitu dengan menggunakan persamaan 2.5. didapatkan besar jari-jari yang akan digunakan untuk perancangan pada penelitian ini yaitu $0,7 \text{ m}$ untuk panjang keseluruhan mulai dari pangkal sampai dengan ujung bilah.

4.1.2 Pemilihan *airfoil*

Pemilihan *airfoil* pada penelitian ini tidak beracuan dengan seberapa besar nilai C_l/C_d terhadap α sebuah *airfoil* melainkan ingin mengetahui pengaruh dari perbedaan *chamber* dan *thickness* yang ditunjukkan pada gambar 2.13 sebuah *airfoil* terhadap performa rancangan akhir bilah *taper less*, *taper*, dan *inverse taper*. Dikarenakan pada PLTB PT. Lentera Bumi Nusantara umumnya menggunakan jenis NACA 4412 dan pada beberapa penelitian banyak menggunakan jenis tersebut, maka jenis NACA 4412 dijadikan sebagai acuan utama dalam pemilihan *airfoil* pada penelitian ini.



Gambar 4 - 1 Karakteristik *airfoil* NACA 4412

Variasi *chamber* yang digunakan pada penelitian ini yaitu seri NACA 3412 dan 5412 sedangkan untuk variasi *thickness* yang digunakan pada penelitian ini

menggunakan seri NACA 4410 dan 4414. Sehingga semakin besar *chamber* sebuah *airfoil* maka semakin besar lengkungan *airfoil* tersebut dan juga semakin besar *thickness* suatu *airfoil* maka semakin tebal juga *airfoil* tersebut. Dibawah ini terdapat tabel 4 – 1 menunjukkan karakteristik *airfoil* untuk masing-masing variasi *chamber* dan tabel 4 – 2 menunjukkan karakteristik *airfoil* untuk masing-masing variasi *thickness*.

Tabel 4 - 1 Karakteristik *airfoil* untuk variasi *chamber*

Name	Thickness (%)	at (%)	Camber (%)	at (%)
NACA 3412	12.00	29.10	3.00	39.50
NACA 4412	12.00	29.10	4.00	39.50
NACA 5412	12.00	29.10	5.00	39.50

Tabel 4 - 2 Karakteristik *airfoil* untuk variasi *thickness*

Name	Thickness (%)	at (%)	Camber (%)	at (%)
NACA 4410	10.00	29.10	4.00	39.50
NACA 4412	12.00	29.10	4.00	39.50
NACA 4414	14.00	29.10	4.00	39.50

Layaknya sebuah fluida, angin yang melewati sebuah penampang *airfoil* juga memiliki bilangan reynolds. Dengan menggunakan data kecepatan angin (V) sebesar 11,8 m/s dan lebar chord (l) untuk *airfoil* yang digunakan 0,12 m dan viskositas kinematik (ν) sebesar $1,46 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ pada ketinggian dibawah 1000 m dengan suhu diatas 15°C . Sehingga untuk mendapatkan bilangan reynolds ini dapat menggunakan persamaan 2.3. ditemukan Bilangan reynolds (Re) yang digunakan pada penelitian ini sebesar 96.986.

4.1.3 Perancangan geometri bilah

Pada sub bab 4.1.3 ini, perancangan untuk geometri bilah pada penelitian ini dibagi menjadi 3 bagian yaitu bagian untuk bilah *taper less*, dan *taper*.

A. Perancangan bilah *airfoil* NACA 4412 jenis *taper less* dan jenis *airfoil* lainnya.

1. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4412.

Pada perancangan bilah jenis *taper less* ini hal pertama yang harus dilakukan ialah menetapkan *chord* bilah ini, karena bilah jenis *taper less* ini memiliki karakteristik yang memiliki lebar *chord* yang sama dari ujung pangkal

sampai dengan ujung bilah. Dikarenakan dudukan bilah pada baling-baling turbin angin di PT. Lentera Bumi Nusantara memiliki dimensi dudukan untuk masing-masing bilah 12 cm, sehingga pada penelitian ini *chord* (Cr) untuk jenis *taper less* menggunakan 12 cm atau 0,12 m begitu juga dengan jenis lainnya memiliki *chord* (Cr) awal sebesar 0,12m juga.

Setelah menentukan *chord* (Cr) untuk bilah tersebut, selanjutnya adalah membagi bilah tersebut menjadi beberapa elemen. Pada keseluruhan bilah yang dirancang pada penelitian ini, bilah dibagi menjadi 10 elemen. Fungsi dari elemen ini adalah untuk mengetahui secara lebih detail nilai-nilai seperti nilai TSR, *twist*, dan parameter lainnya pada titik tertentu atau titik yang ingin dicari. Selain untuk mengetahui nilai-nilai tersebut, elemen-elemen ini juga dapat membantu proses pembuatan atau manufaktur dari bilah tersebut agar bilah ini dapat dibuat dengan lebih mudah. 10 elemen tersebut belum termasuk dengan elemen pada ujung pangkal dalam artian elemen tersebut masih memiliki elemen 0 atau elemen pangkal. Sehingga pada perancangan semua jenis bilah menggunakan elemen dengan total 11 elemen.

Setelah menentukan berapa elemen yang akan dirancang pada bilah tersebut langkah selanjutnya adalah mencari jari-jari parsial (r) untuk tiap-tiap elemen tersebut. Jari-jari parsial (r) yang digunakan pada penelitian ini mengikuti bilah pltb di PT. Lentera Bumi Nusantara menggunakan jari-jari parsial (r) untuk elemen pertama dengan panjang 0,17 m (elemen 0 atau elemen pangkal), karena disesuaikan dengan dimensi pada spesifikasi turbin angin yang digunakan. Sehingga untuk mengetahui jari-jari parsial pada elemen selanjutnya dapat menggunakan persamaan 2.6 dan mendapatkan nilai jari-jari parsial pada elemen ke-1 sebesar 0,22 m.

Untuk mempermudah keseluruhan perhitungan pada penelitian ini, maka digunakan perangkat lunak pembantu yaitu Microsoft excel karena untuk mencari jari-jari parsial pada elemen lainnya dan perhitungan parameter lainnya dengan pada elemen yang ingin dicari menggunakan persamaan yang sama dengan perhitungan pada elemen sebelumnya. Maka didapat data jari-jari parsial untuk bilah *taper less* seperti pada tabel 4 – 3 dibawah ini.

Tabel 4 - 3 Jari-jari parsial untuk bilah *taper less* 4412

Elemen	Jari-jari parsial (r)
0	0,17 m
1	0,22 m
2	0,28 m
3	0,33 m
4	0,38 m
5	0,44 m
6	0,49 m
7	0,54 m
8	0,59 m
9	0,65 m
10	0,70 m

Setelah mendapatkan jari-jari parsial dari bilah yang ingin dirancang. Selanjutnya adalah menemukan *Tip Speed Ratio* (TSR) parsial untuk masing-masing elemen. *Tip Speed Ratio* adalah kecepatan bilah dengan kecepatan angin relatif yang dimana semakin besar TSR yang dimiliki oleh sebuah bilah maka semakin kecil sudut yang dimiliki dari bilah tersebut. Untuk *blade rotor* atau baling-baling dengan jumlah sudu 3 pada umumnya menggunakan TSR pada kisaran 6 – 8, dan untuk penelitian ini menggunakan 7 untuk TSR (λ) total. Lalu untuk mengetahui TSR parsial (λr) pada elemen 0 dapat menggunakan persamaan 2.7 dengan jari-jari parsial pada elemen ke 0 sebesar 0,17 m dan jari-jari perancangan yang digunakan sebesar 0,7 maka didapatkan nilai TSR parsial pada elemen ke 0 sebesar 1,7. Dengan bantuan microsoft excel maka didapatkan data TSR untuk elemen lainnya pada bilah *taper less* seperti pada tabel 4 – 4 dibawah ini.

Tabel 4 - 4 Tip Speed Ratio untuk bilah taper less 4412

Elemen	Tip Speed Ratio parsial (λr)
0	1,7
1	2,2
2	2,8
3	3,3
4	3,8
5	4,4
6	4,9
7	5,4
8	5,9
9	6,5
10	7,0

Setelah mendapatkan nilai TSR parsial dari bilah yang ingin dirancang ini, selanjutnya adalah menemukan *flow angle* (ϕ). *Flow angle* adalah besar sudut yang terbentuk oleh kecepatan angin relatif dengan bidang rotor. Pada gambar 2 – 10, sudut *flow angle* ini merupakan sudut besar yang didalamnya terdiri dari sudut serang atau *angle of attack* (α) dan sudut puntir atau *twist* (β). Dengan menggunakan nilai pada TSR parsial elemen ke 0 sebesar 1,7 maka dapat diketahui *flow angle* elemen ke-0 dengan menggunakan persamaan 2.9 yaitu sebesar 20,310°. Dengan bantuan microsoft excel maka didapatkan data *flow angle* untuk elemen lainnya pada bilah *taper less* seperti pada tabel 4 – 5 dibawah ini.

Tabel 4 - 5 Flow angle untuk bilah taper less 4412

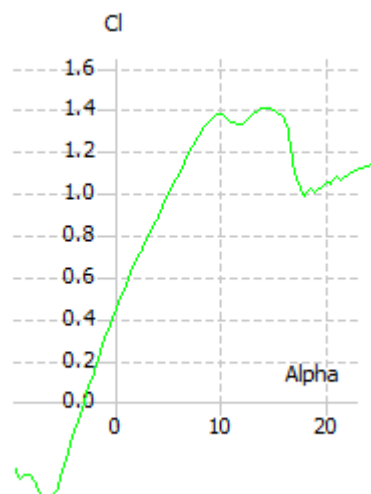
Elemen	Flow angle (ϕ)
0	20,310 °
1	16,102 °
2	13,278 °
3	11,271 °
4	9,780 °
5	8,631 °
6	7,720 °
7	6,982 °
8	6,371 °
9	5,857 °
10	5,420 °

Setelah mendapatkan sudut *flow angle* (ϕ) dari bilah *taper less*, hal yang perlu diketahui selanjutnya ialah mengetahui *Coefisien of Lift* (*Cl*) atau koefisien angkatnya. Dalam merancang sebuah bilah, kita ingin mendapatkan bilah dengan koefisien angkat yang dengan hasil maksimal untuk dapat mengangkat dari masing-masing penampang *airfoil* tersebut. pada bilah dengan *chord* (*Cr*) yang konstan atau seperti jenis *taper less* ini, perlu diketahui nilai *Cl* tiap masing-masing elemennya. Dengan menggunakan data seperti jumlah bilah (*B*) berjumlah 3, jari jari perancangan yang digunakan sebesar 0,7, jari-jari parsial pada elemen ke-0 sebesar 0,17 m, TSR yang digunakan untuk bilah berjumlah 3 yaitu 7 dan *chord* bilah taperless yaitu 0,12 m, maka dapat diketahui nilai *Coefisien of Lift* (*Cl*) pada elemen ke 0, dapat menggunakan persamaan 2.8 yaitu 1,17. Dengan bantuan microsoft excel maka didapatkan data *Coefisien of Lift* (*Cl*) untuk elemen lainnya pada bilah *taper less* seperti pada tabel 4 – 6 dibawah ini.

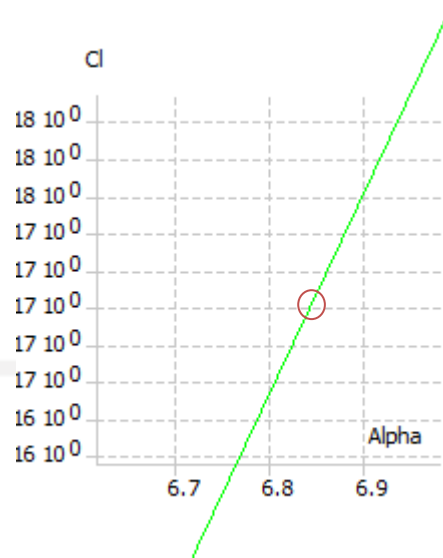
Tabel 4 - 6 Coefisien of Lift bilah jenis taper less 4412

Elemen	Coefisien of Lift (Cl)
0	1,17
1	0,89
2	0,72
3	0,61
4	0,52
5	0,46
6	0,41
7	0,37
8	0,34
9	0,31
10	0,28

Setelah mendapatkan nilai *Coefisien of Lift (Cl)*, dengan menggunakan nilai-nilai tersebut maka nilai sudut serang dari angin atau *angle of attack (α)* dapat ditemukan dengan menggunakan kurva dari *Cl* terhadap α yang dihasilkan oleh perangkat lunak Qblade V. 0.963. nilai *alpha* ini nantinya dapat digunakan untuk mendapatkan nilai *twist*. kurva ini didapatkan setelah mengimpor *airfoil* yang ingin digunakan dan menginput bilangan reynolds yang didapatkan dari perhitungan persamaan 2.3 seperti pada gambar 4 – 2 dibawah ini.



Gambar 4 - 2 Kurva Cl terhadap angle of attack



Gambar 4 - 3 Mencari nilai α atau angle of attack pada kurva C_l terhadap angle of attack bilah jenis taper less

Pada gambar 4 – 3 diatas ini merupakan kurva C_l terhadap angle of attack (α) apabila diperbesar untuk mendapatkan nilai α . Pada elemen 0 yang memiliki nilai C_l berjumlah 1,17 memiliki nilai α 6,85. Begitu juga dengan nilai α pada elemen yang lainnya, sehingga didapatkan data nilai α pada masing-masing elemen pada tabel 4 – 7 dibawah ini.

Tabel 4 - 7 Alpha bilah jenis taper less 4412

Elemen	Angle of attack (α)
0	6,85 °
1	4,08 °
2	2,47 °
3	1,52 °
4	0,72 °
5	0,17 °
6	-0,19 °
7	-0,43 °
8	-0,64 °
9	-0,86 °
10	-1,07 °

Setelah mendapatkan nilai α untuk jenis bilah ini, selanjutnya adalah mencari nilai sudut puntirnya atau dapat disebut $twist (\beta)$. Sudut puntir ini dapat diketahui dengan menggunakan sudut $flow\ angle$ dan sudut α . Dengan menggunakan nilai α pada elemen ke-0 sebesar $6,85^\circ$ dan nilai $flow\ angle$ pada elemen ke-0 sebesar $20,310^\circ$ maka dapat diketahui sudut puntir elemen ke 0 pada bilah jenis *taper less ini*, dapat menggunakan persamaan 2.10 yaitu $13,460^\circ$. Dengan bantuan microsoft excel maka didapatkan data sudut puntir atau $twist (\beta)$ untuk elemen lainnya pada bilah *taper less* seperti pada tabel 4 – 8 dibawah ini.

Tabel 4 - 8 Twist bilah jenis *taper less* 4412

Elemen	$twist (\beta)$
0	$13,460^\circ$
1	$12,022^\circ$
2	$10,808^\circ$
3	$9,751^\circ$
4	$9,058^\circ$
5	$8,461^\circ$
6	$7,905^\circ$
7	$7,412^\circ$
8	$7,006^\circ$
9	$6,712^\circ$
10	$6,490^\circ$

Setelah mendapatkan nilai $twist$ untuk bilah jenis *taperless* ini, maka data-data pada tabel-tabel 4 – 3 sampai dengan 4 – 8 yang telah dibuat tersebut dikumpulkan menjadi satu, sehingga terkumpul data perancangan pada tabel 4 – 9 dibawah ini untuk bilah jenis *taper less* dengan *airfoil* NACA 4412.

Tabel 4 - 9 Data perancangan bilah jenis *taper less* dengan *airfoil* NACA 4412

Elemen (<i>n</i>)	Jari-jari Parsial (<i>r</i>)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	CL	<i>Alpha</i> parsial (α)	<i>Twist</i> parsial (β)
0	0,17 m	1,7	20,310°	1,17	6,85°	13.460°
1	0,22 m	2,2	16,102°	0,89	4,08°	12.022°
2	0,28 m	2,8	13,278°	0,72	2,47°	10.808°
3	0,33 m	3,3	11,271°	0,61	1,52°	9.751°
4	0,38 m	3,8	9,780°	0,52	0,72°	9.058°
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,46	0,17°	8.461°
6	0,49 m	4,9	7,720°	0,41	-0.19°	7.905°
7	0,54 m	5,4	6,982°	0,37	-0.43°	7.412°
8	0,59 m	5,9	6,371°	0,34	-0.64°	7.006°
9	0,65 m	6,5	5,857°	0,31	-0.86°	6.712°
10	0,70 m	7,0	5,420°	0,28	-1.07°	6.490°

2. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 3412.

Pada perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 3412 ini juga memiliki langkah pengerjaan yang sama dengan perancangan jenis *airfoil* sebelumnya. Maka didapatkan data perancangan untuk bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 3412 pada tabel 4 – 10 dibawah ini.

Tabel 4 - 10 Data perancangan bilah jenis *taper less* dengan *airfoil* NACA 3412

Elemen (<i>n</i>)	Jari-jari Parsial (<i>r</i>)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	CL	<i>Alpha</i> parsial (α)	<i>Twist</i> parsial (β)
0	0,17 m	1,7	20,310°	1,17	8,55°	11,760°
1	0,22 m	2,2	16,102°	0,89	4,98°	11,127°
2	0,28 m	2,8	13,278°	0,72	3,28°	10,003°
3	0,33 m	3,3	11,271°	0,61	2,28°	8,991°
4	0,38 m	3,8	9,780°	0,52	1,48°	8,305°
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,46	0,95°	7,686°
6	0,49 m	4,9	7,720°	0,41	0,52°	7,200°
7	0,54 m	5,4	6,982°	0,37	0,20°	6,782°
8	0,59 m	5,9	6,371°	0,34	-0,05°	6,421°
9	0,65 m	6,5	5,857°	0,31	-0,28°	6,132°
10	0,70 m	7,0	5,420°	0,28	-0,49°	5,910°

3. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 5412.

Pada perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 5412 ini juga memiliki langkah pengerjaan yang sama dengan perancangan jenis *airfoil* sebelumnya. Maka didapatkan data perancangan untuk bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 5412 pada tabel 4 – 11 dibawah ini.

Tabel 4 - 11 Data perancangan bilah jenis *taper less* dengan *airfoil* NACA 5412

Elemen (<i>n</i>)	Jari-jari Parsial (<i>r</i>)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	CL	<i>Alpha</i> parsial (α)	<i>Twist</i> parsial (β)
0	0,17 m	1,7	20,310°	1,17	5,95°	14,360°
1	0,22 m	2,2	16,102°	0,89	3,45°	12,652°
2	0,28 m	2,8	13,278°	0,72	1,60°	11,678°
3	0,33 m	3,3	11,271°	0,61	0,72°	10,551°
4	0,38 m	3,8	9,780°	0,52	-0,04°	9,820°
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,46	-0,44°	9,071°
6	0,49 m	4,9	7,720°	0,41	-0,90°	8,620°
7	0,54 m	5,4	6,982°	0,37	-1,19°	8,172°
8	0,59 m	5,9	6,371°	0,34	-1,37°	7,741°
9	0,65 m	6,5	5,857°	0,31	-1,56°	7,417°
10	0,70 m	7,0	5,420°	0,28	-1,80°	7,220°

4. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4410.

Pada perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4410 ini juga memiliki langkah pengerjaan dengan jenis yang sebelumnya. Berikut merupakan data perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4410 pada tabel 4 – 12 dibawah ini.

Tabel 4 - 12 Data perancangan bilah jenis *taper less* dengan *airfoil* NACA 4410

Elemen (<i>n</i>)	Jari-jari Parsial (<i>r</i>)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	CL	<i>Alpha</i> parsial (α)	<i>Twist</i> parsial (β)
0	0,17 m	1,7	20,310°	1,17	6,80°	13,510°
1	0,22 m	2,2	16,102°	0,89	4,00°	12,102°
2	0,28 m	2,8	13,278°	0,72	2,48°	10,798°
3	0,33 m	3,3	11,271°	0,61	1,46°	9,811°
4	0,38 m	3,8	9,780°	0,52	0,76°	9,020°
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,46	0,35°	8,281°
6	0,49 m	4,9	7,720°	0,41	-0,03°	7,750°
7	0,54 m	5,4	6,982°	0,37	-0,31°	7,292°
8	0,59 m	5,9	6,371°	0,34	-0,53°	6,896°
9	0,65 m	6,5	5,857°	0,31	-0,73°	6,587°
10	0,70 m	7,0	5,420°	0,28	-0,92°	6,340°

5. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4414.

Pada perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4414 ini juga memiliki langkah pengerjaan yang sama dengan perancangan pada jenis sebelumnya. Berikut merupakan data perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4414 pada tabel 4 – 13 dibawah ini.

Tabel 4 - 13 Data perancangan bilah jenis *taper less* dengan *airfoil* NACA 4414

Elemen (<i>n</i>)	Jari-jari Parsial (<i>r</i>)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	CL	<i>Alpha</i> parsial (α)	<i>Twist</i> parsial (β)
0	0,17 m	1,7	20,310°	1,17	7,02°	13,290°
1	0,22 m	2,2	16,102°	0,89	4,19°	11,912°
2	0,28 m	2,8	13,278°	0,72	2,52°	10,758°
3	0,33 m	3,3	11,271°	0,61	1,52°	9,751°
4	0,38 m	3,8	9,780°	0,52	0,63°	9,155°
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,46	0,14°	8,491°
6	0,49 m	4,9	7,720°	0,41	-0,32°	8,040°
7	0,54 m	5,4	6,982°	0,37	-0,59°	7,572°
8	0,59 m	5,9	6,371°	0,34	-0,72°	7,091°
9	0,65 m	6,5	5,857°	0,31	-0,84°	6,697°
10	0,70 m	7,0	5,420°	0,28	-0,96°	6,380°

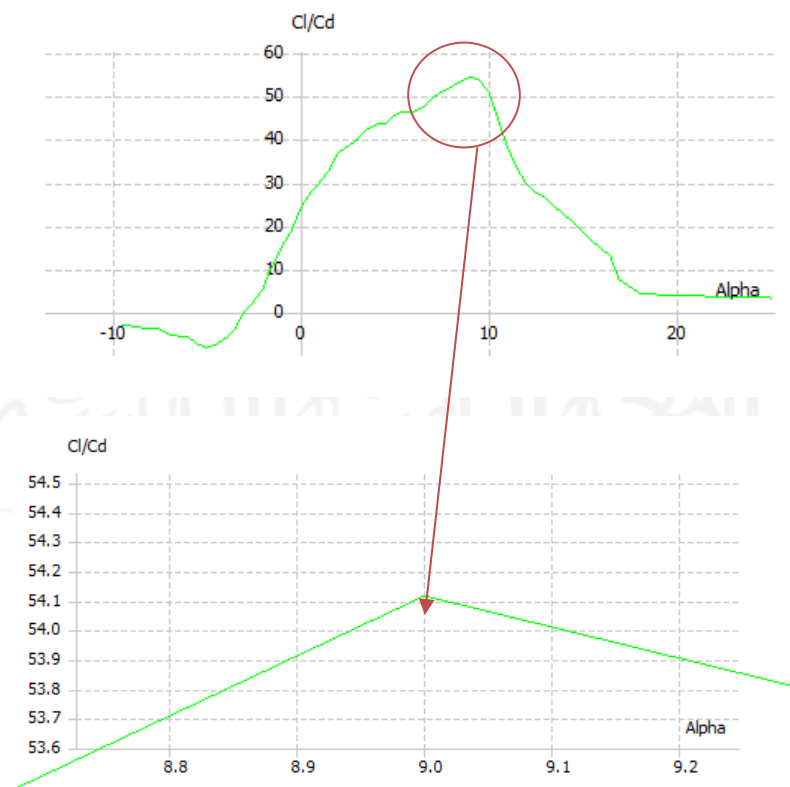
B. Perancangan bilah *airfoil* NACA 4412 jenis *taper* dan jenis *airfoil* lainnya

1. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4412.

Pada perancangan bilah dengan *airfoil* NACA 4412 jenis *taper* memiliki langkah awal yang sama dengan jenis *taper less* sehingga memiliki data jari-jari parsial, TSR parsial dan *flow angle* parsial untuk masing-masing elemen yang serupa. Sehingga pada jari-jari parsial, TSR parsial, dan *flow angle* parsial untuk bilah dengan jenis *taper* ini menggunakan data bilah jenis *taper less*.

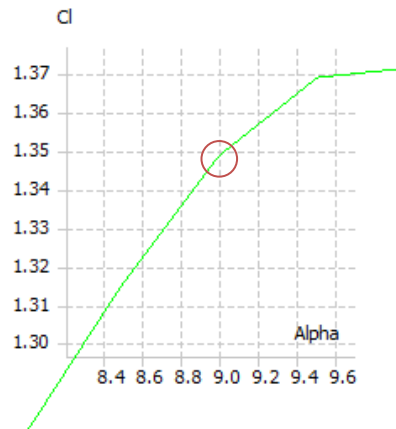
Nilai *Coefisien of Lift (Cl)* pada bilah jenis ini bergantung pada kurva *Cl/Cd* karena titik *alpha* didapatkan dari kurva *Cl/Cd* tersebut. Kurva *Cl/Cd* adalah rasio gaya angkat terhadap gaya hambat yang dimiliki oleh suatu *airfoil*. Kurva *Cl/Cd* berkaitan dengan bilangan reynolds, semakin tinggi bilangan reynolds semakin tinggi nilai *Cl/Cd* maksimal yang didapatkan begitu juga sebaliknya. Apabila nilai *Cl/Cd* semakin tinggi maka nilai *Cl* dan *Cd*nya juga semakin besar. Sehingga nilai *Cl* pada bilah jenis ini tidak dicari per elemennya melainkan hanya ditetapkan diawal dengan menggunakan nilai *alpha* yang didapatkan pada kurva *Cl/Cd*.

Apabila nilai *Cl* tersebut dimasukkan kedalam persamaan 2.9, maka akan menghasilkan nilai *chord (Cr)* yang semakin mengecil atau meruncing. Sesuai dengan karakteristik dari jenis bilah *taper* yang memiliki jenis bilah semakin kecil ke ujung bilah tersebut. berbeda dengan jenis *taper less* yang sudah ditetapkan lebar *Cr*nya diawal. Tetapi untuk mendapatkan nilai *alpha* pada perancangan jenis *taper* ini, nilai *alpha* diambil dari kurva *Cl/Cd* terhadap *alpha* saat berada pada titik maksimalnya. Nilai *Cl/Cd* maks pada *airfoil* NACA 4412 ini yaitu 54,11 yang dapat dilihat pada gambar 4 – 4 dibawah ini.



Gambar 4 - 4 Nilai maksimal *Cl/Cd*

Dari gambar 4 – 4 diatas, dapat dilihat bahwa nilai α yang didapatkan pada nilai 9. Dikarenakan nilai α sudah ditetapkan diawal maka, maka didapatkan nilai Cl yaitu 1,35 dan sudut α yaitu 9 yang dapat dilihat pada gambar 4 – 5 dibawah ini.



Gambar 4 - 5 Nilai Cl pada bilah *taper*

Untuk mendapatkan nilai $flow\ angle$ pada bilah jenis ini dapat menggunakan persamaan 2.9 dengan menggunakan nilai TSR 7. Sehingga didapatkan nilai $flow\ angle$ pada elemen ke-0 berjumlah $20,310^\circ$ lalu dilakukan juga pengerjaan dengan pengerjaan yang sama dengan persamaan 2.9 pada elemen yang lainnya sehingga diperoleh data pada tabel 4 – 14 dibawah ini

Tabel 4 - 14 $Flow\ angle$ untuk bilah *taper* 4412

Elemen	$Flow\ angle\ (\phi)$
0	$20,310^\circ$
1	$16,102^\circ$
2	$13,278^\circ$
3	$11,271^\circ$
4	$9,780^\circ$
5	$8,631^\circ$
6	$7,720^\circ$
7	$6,982^\circ$
8	$6,371^\circ$
9	$5,857^\circ$
10	$5,420^\circ$

Dengan menggunakan data *flow angle* pada tabel 4 – 14 dan nilai *alpha* berjumlah 9, maka sudut puntir untuk elemen 0 pada bilah *taper* ini dapat ditemukan dengan menggunakan persamaan 2.10 berjumlah 11,31°. Dengan bantuan microsoft excel maka didapatkan data sudut puntir atau *twist* (β) untuk elemen lainnya pada bilah *taper* seperti pada tabel 4 – 15 dibawah ini.

Tabel 4 - 15 Twist bilah jenis *taper* 4412

Elemen	<i>twist</i> (β)
0	11,31 °
1	7,10 °
2	4,28 °
3	2,27 °
4	0,78 °
5	-0,37 °
6	-1,28 °
7	-2,02 °
8	-2,63 °
9	-3,14 °
10	-3,58 °

Setelah mendapatkan nilai *twist* untuk bilah jenis *taper* ini, selanjutnya adalah mencari *chord* bilah. Nilai *chord* yang digunakan pada bilah *taper* harus dicari karena chord pada bilah *taper* semakin ke ujung bilah dimensinya semakin mengecil. Dengan jumlah bilah yang digunakan berjumlah 3, TSR yang digunakan 7, jari-jari parsial elemen ke-0 sebesar 0,17 dan jari-jari perancangan 0,7 m, maka nilai *chord* elemen ke 0 pada bilah jenis *taper* ini dapat menggunakan persamaan 2.8 yaitu 0,081 m. Dengan bantuan microsoft excel maka didapatkan data *Chord* (*Cr*) untuk elemen lainnya pada bilah *taper* seperti pada tabel 4 – 16 dibawah ini.

Tabel 4 - 16 Chord bilah jenis taper 4412

Elemen	Chord (<i>Cr</i>)
0	0,081 m
1	0,062 m
2	0,050 m
3	0,042 m
4	0,036 m
5	0,032 m
6	0,028 m
7	0,025 m
8	0,023 m
9	0,021 m
10	0,020 m

Pada tabel 4 – 16 diatas menunjukkan pada elemen ke 0 bernilai 0,081 m. Dimensi *Cr* pada elemen ke-0 tersebut tidak sesuai dengan spesifikasi pada rotor turbin angin di PT. Lentera Bumi Nusantara yang memiliki spesifikasi 0,12 m. Oleh karena itu keseluruhan dari nilai pada elemen-elemen tersebut ditambahkan 0,039 m agar dapat menyesuaikan dengan turbin angin tersebut. yang dapat dilihat pada tabel 4 – 17 dibawah ini.

Tabel 4 - 17 *Chord* bilah jenis *taper* setelah disesuaikan dengan spesifikasi turbin angin

Elemen	<i>Chord (Cr)</i> +0,039
0	0,120 m
1	0,101 m
2	0,089 m
3	0,081 m
4	0,075 m
5	0,071 m
6	0,067 m
7	0,064 m
8	0,062 m
9	0,060 m
10	0,059 m

Setelah mendapatkan nilai *chord* yang digunakan pada penelitian ini, data-data yang telah didapatkan pada tabel 4 – 3 sampai 4 – 4, dan 4 – 14 sampai 4 – 17 sebelumnya disatukan menjadi data perancangan untuk bilah jenis *taper* dengan *airfoil* NACA 4412 pada tabel 4 – 18 dibawah ini.

Tabel 4 - 18 Data perancangan bilah jenis *taper* dengan *airfoil* NACA 4412

Elemen (<i>n</i>)	Jari-jari Parsial (<i>r</i>)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	<i>Twist</i> parsial (β)	<i>Chord</i> parsial (<i>Cr</i>)
0	0,17 m	1,7	20,310°	11,31°	0,120 m
1	0,22 m	2,2	16,102°	7,10°	0,101 m
2	0,28 m	2,8	13,278°	4,28°	0,089 m
3	0,33 m	3,3	11,271°	2,27°	0,081 m
4	0,38 m	3,8	9,780°	0,78°	0,075 m
5	0,44 m	4,4	8,631°	-0,37°	0,071 m
6	0,49 m	4,9	7,720°	-1,28°	0,067 m
7	0,54 m	5,4	6,982°	-2,02°	0,064 m
8	0,59 m	5,9	6,371°	-2,63°	0,062 m
9	0,65 m	6,5	5,857°	-3,14°	0,060 m
10	0,70 m	7,0	5,420°	-3,58°	0,059 m

2. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 3412.

Pada perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 3412 ini juga memiliki langkah pengerjaan dengan jenis yang sebelumnya. Berikut merupakan data perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 3412 pada tabel 4 – 19 dibawah ini.

Tabel 4 - 19 Data perancangan bilah jenis *taper* dengan *airfoil* NACA 3412

Elemen (<i>n</i>)	Jari-jari Parsial (<i>r</i>)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	<i>Twist</i> parsial (β)	<i>Chord</i> parsial (<i>Cr</i>)
0	0,17 m	1,7	20,310°	12,31°	0,120 m
1	0,22 m	2,2	16,102°	8,10°	0,098 m
2	0,28 m	2,8	13,278°	5,28°	0,084 m
3	0,33 m	3,3	11,271°	3,27°	0,074 m
4	0,38 m	3,8	9,780°	1,78°	0,068 m
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,63°	0,063 m
6	0,49 m	4,9	7,720°	-0,28°	0,059 m
7	0,54 m	5,4	6,982°	-1,02°	0,055 m
8	0,59 m	5,9	6,371°	-1,63°	0,053 m
9	0,65 m	6,5	5,857°	-2,14°	0,051 m
10	0,70 m	7,0	5,420°	-2,58°	0,049 m

3. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 5412.

Pada perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 5412 ini juga memiliki langkah pengerjaan dengan jenis yang sebelumnya. Berikut merupakan data perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 5412 pada tabel 4 – 20 dibawah ini.

Tabel 4 - 20 Data perancangan bilah jenis *taper* dengan *airfoil* NACA 5412

Elemen (<i>n</i>)	Jari-jari Parsial (<i>r</i>)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	<i>Twist</i> parsial (β)	<i>Chord</i> parsial (<i>Cr</i>)
0	0,17 m	1,7	20,310°	10,31°	0,120 m
1	0,22 m	2,2	16,102°	6,10°	0,103 m
2	0,28 m	2,8	13,278°	3,28°	0,092 m
3	0,33 m	3,3	11,271°	1,27°	0,085 m
4	0,38 m	3,8	9,780°	-0,22°	0,080 m
5	0,44 m	4,4	8,631°	-1,37°	0,076 m
6	0,49 m	4,9	7,720°	-2,28°	0,073 m
7	0,54 m	5,4	6,982°	-3,02°	0,071 m
8	0,59 m	5,9	6,371°	-3,63°	0,069 m
9	0,65 m	6,5	5,857°	-4,14°	0,067 m
10	0,70 m	7,0	5,420°	-4,58°	0,065 m

4. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4410.

Pada perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 4410 ini juga memiliki langkah pengerjaan dengan jenis yang sebelumnya. Berikut merupakan data perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 4410 pada tabel 4 – 21 dibawah ini.

Tabel 4 - 21 Data perancangan bilah jenis *taper* dengan *airfoil* NACA 4410

Elemen (<i>n</i>)	Jari-jari Parsial (<i>r</i>)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	<i>Twist</i> parsial (β)	<i>Chord</i> parsial (<i>Cr</i>)
0	0,17 m	1,7	20,310°	12,31°	0,120 m
1	0,22 m	2,2	16,102°	8,10°	0,099 m
2	0,28 m	2,8	13,278°	5,28°	0,086 m
3	0,33 m	3,3	11,271°	3,27°	0,078 m
4	0,38 m	3,8	9,780°	1,78°	0,072 m
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,63°	0,067 m
6	0,49 m	4,9	7,720°	-0,28°	0,063 m
7	0,54 m	5,4	6,982°	-1,02°	0,060 m
8	0,59 m	5,9	6,371°	-1,63°	0,058 m
9	0,65 m	6,5	5,857°	-2,14°	0,056 m
10	0,70 m	7,0	5,420°	-2,58°	0,054 m

5. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4414.

Pada perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 4414 ini juga memiliki langkah pengerjaan dengan jenis yang sebelumnya. Berikut merupakan data perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 4414 pada tabel 4 – 22 dibawah ini.

Tabel 4 - 22 Data perancangan bilah jenis *taper* dengan *airfoil* NACA 4414

Elemen (<i>n</i>)	Jari-jari Parsial (<i>r</i>)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	<i>Twist</i> parsial (β)	<i>Chord</i> parsial (<i>Cr</i>)
0	0,17 m	1,7	20,310°	10,31°	0,120 m
1	0,22 m	2,2	16,102°	6,10°	0,102 m
2	0,28 m	2,8	13,278°	3,28°	0,091 m
3	0,33 m	3,3	11,271°	1,27°	0,083 m
4	0,38 m	3,8	9,780°	-0,22°	0,077 m
5	0,44 m	4,4	8,631°	-1,37°	0,073 m
6	0,49 m	4,9	7,720°	-2,28°	0,070 m
7	0,54 m	5,4	6,982°	-3,02°	0,067 m
8	0,59 m	5,9	6,371°	-3,63°	0,065 m
9	0,65 m	6,5	5,857°	-4,14°	0,063 m
10	0,70 m	7,0	5,420°	-4,58°	0,062 m

4.1.4 Simulasi bilah dengan perangkat lunak Qblade V.0.963

Pada bagian simulasi perangkat lunak ini, masing-masing bilah yang telah dirancang tersebut akan diinput kedalam perangkat lunak Qblade V.0.963 untuk mengetahui performa dari masing-masing bilah dengan *airfoil*nya. Parameter performa yang digunakan adalah seberapa besar bilah tersebut dapat menyerap energi angin dalam satuan persentase (%). Parameter ini didapatkan dari kurva *Cp* terhadap TSR didalam fitur ROTOR BEM SIMULATION pada perangkat lunak Qblade V.0.963.

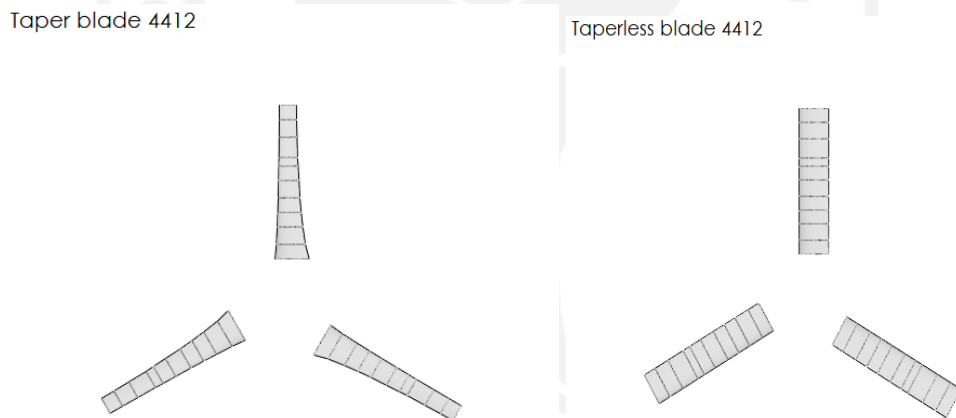
Untuk mendapatkan hasil kurva tersebut, diperlukan parameter input jari-jari parsial (*r*), *chord*, dan *twist* terlebih dahulu kedalam fitur HAWT

ROTORBLADE DESIGN. Fitur ini merupakan fitur yang dapat memproses hasil desain dari parameter yang telah diinput. Gambar 4 – 6 dibawah ini merupakan proses pemasukan parameter yang dibutuhkan kedalam perangkat lunak.

Blade Data
Taper blade 4412
3 blades and 0.17 m hub radius Blade Root Coordinates

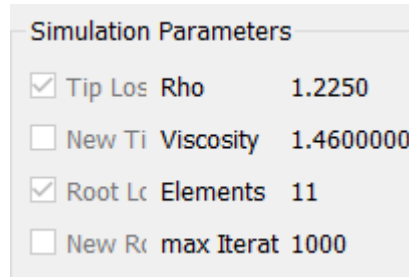
	Pos (m)	Chord (m)	Twist	Foil	Polar
1	0	0,12	11,31	NACA 4412	T1_Re0.097_M0.00_N9.0 360 M
2	0,05	0,101	7,1	NACA 4412	T1_Re0.097_M0.00_N9.0 360 M
3	0,11	0,089	4,28	NACA 4412	T1_Re0.097_M0.00_N9.0 360 M
4	0,16	0,081	2,27	NACA 4412	T1_Re0.097_M0.00_N9.0 360 M
5	0,21	0,075	0,78	NACA 4412	T1_Re0.097_M0.00_N9.0 360 M
6	0,27	0,071	-0,37	NACA 4412	T1_Re0.097_M0.00_N9.0 360 M
7	0,32	0,067	-1,28	NACA 4412	T1_Re0.097_M0.00_N9.0 360 M
8	0,35	0,064	-2,02	NACA 4412	T1_Re0.097_M0.00_N9.0 360 M
9	0,42	0,062	-2,63	NACA 4412	T1_Re0.097_M0.00_N9.0 360 M
10	0,48	0,06	-3,14	NACA 4412	T1_Re0.097_M0.00_N9.0 360 M
11	0,53	0,059	-3,58	NACA 4412	T1_Re0.097_M0.00_N9.0 360 M

Gambar 4 - 6 Penginputan parameter-parameter yang dibutuhkan kedalam perangkat lunak



Gambar 4 - 7 Hasil desain yang di proses sesuai parameter yang diinput

Gambar 4 – 7 diatas merupakan hasil desain yang diolah otomatis oleh perangkat lunak sesuai dengan parameter yang dimasukkan. Setelah menginput keseluruhan perancangan kedalam perangkat lunak ini, langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan menggunakan fitur ROTOR BEM SIMULATION dengan pengaturan analisa simulasi dengan kecepatan angin yang digunakan adalah $11,8 \text{ m/s}^2$ dan parameter simulasi yang sudah diinput, dapat dilihat pada gambar 4 – 8 dibawah ini



Gambar 4 - 8 Parameter simulasi ROTOR BEM SIMULATION

4.2 Analisis dan Pembahasan

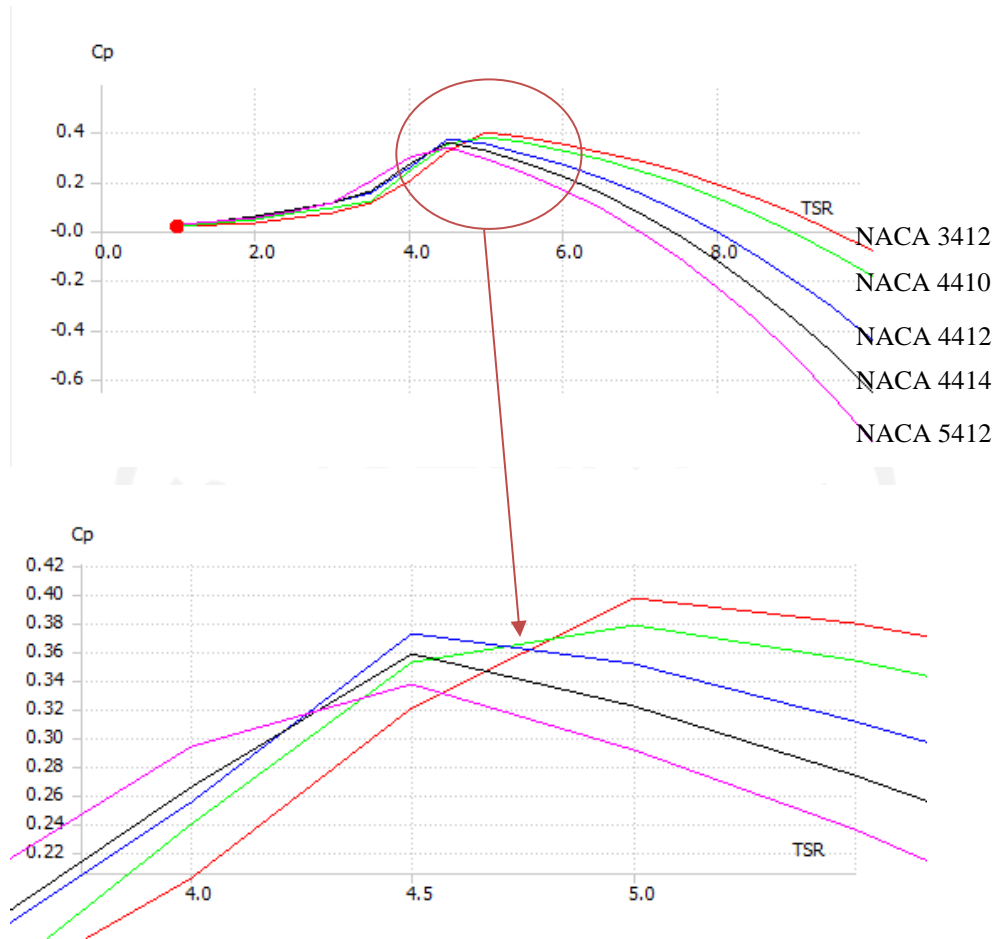
A. Analisis kemampuan penyerapan daya angin

Adapun variabel yang ditentukan pada penelitian ini, seperti pada tabel 4 – 23 dibawah ini.

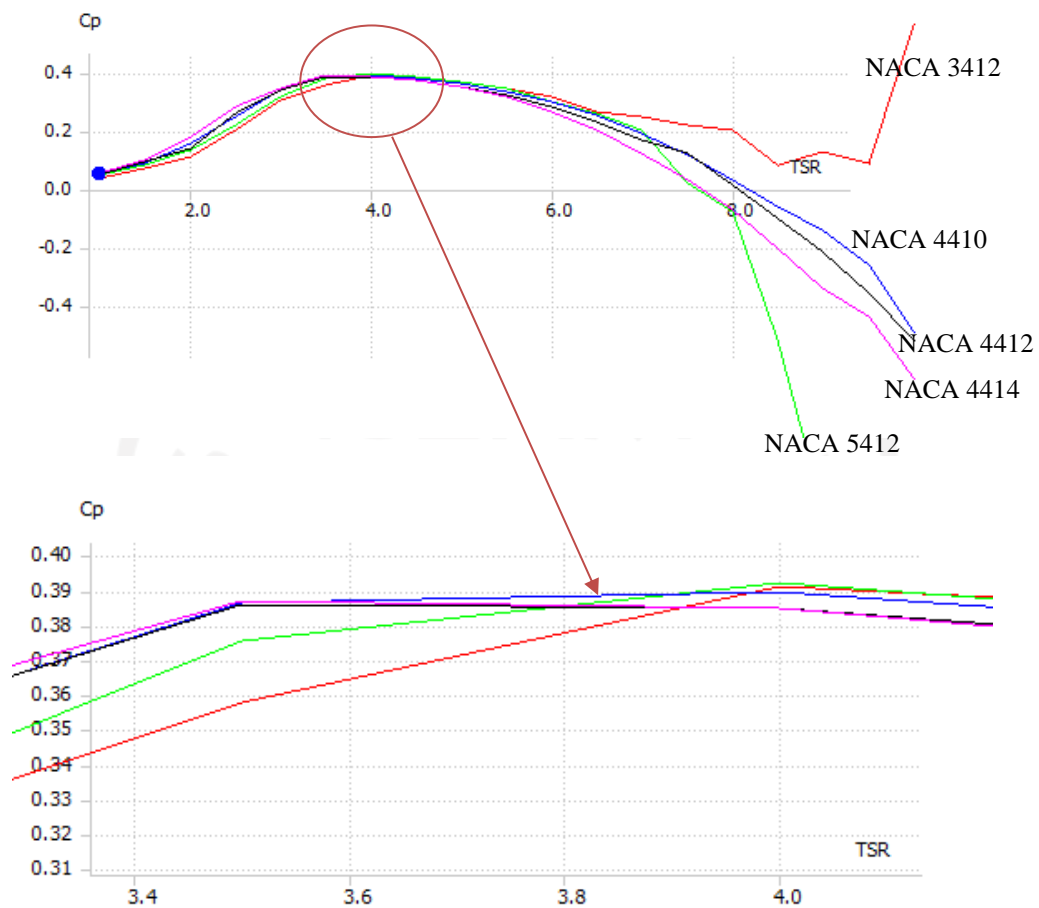
Tabel 4 - 23 Variabel penelitian

Variabel independen	Jenis, karakteristik, daya yang ingin dihasilkan
Variabel dependen	Nilai <i>Coefisien of power</i> , daya yang dihasilkan
Variabel kontrol	Kecepatan angin, viskositas dinamika, massa jenis angin, elemen, bilangan reynolds

Pada tabel 4 – 23 diatas, dapat dilihat bahwa variabel-independen dan kontrol mempengaruhi variabel dependen karena variabel dependen ini merupakan variabel yang diteliti. Pada sub bab 4.14 telah membahas proses simulasi dari awal hingga ke akhir, dan untuk hasil dari simulasi tersebut didapat kurva C_p terhadap TSR pada bilah jenis *taper* dilihat pada gambar 4 – 9 dan bilah jenis *taper less* dilihat pada gambar 4 – 10 dibawah ini.



Gambar 4 - 9 Kurva C_p terhadap TSR bilah jenis *taper*



Gambar 4 - 10 Kurva C_p terhadap TSR bilah jenis *taper less*

Gambar 4 – 9 dan 4 – 10 diatas menunjukkan performa dari masing-masing bilah untuk dapat menyerap energi angin. Untuk simulasi pada bilah jenis *taper* diperoleh nilai C_p untuk NACA 3412 sebesar 0,396 atau 39,6 % pada TSR 5, NACA 4410 sebesar 0,377 atau 37,7% pada TSR 5 , NACA 4412 sebesar 0,372 atau 37,2% pada TSR 4,5, NACA 4414 sebesar 0,357 atau 35,7% atau pada TSR 4,5, dan NACA 5412 sebesar 0,336 atau 33,6% pada TSR 4,5. Lalu pada simulasi bilah jenis *taper less* diperoleh nilai C_p untuk NACA 3412 sebesar 0,391 atau 39,1% pada TSR 4, NACA 4410 sebesar 0,392 atau 39,2% pada TSR 4, NACA 4412 sebesar 0,389 atau 38,9 % pada TSR 4, NACA 4414 sebesar 0,387 atau 38,7 % pada TSR 3,5, dan NACA 5412 sebesar 0,385 atau 38,5 % pada TSR 3,5 yang dapat dilihat pada tabel 4 – 24 dibawah ini.

Tabel 4 - 24 Nilai C_p terhadap TSR

Jenis <i>airfoil</i>	Bilah <i>taper</i>		Bilah <i>taper less</i>	
	Nilai C_p	Nilai TSR	Nilai C_p	Nilai TSR
NACA 3412	39,6%	5	39,1%	4
NACA 4410	37,7%	5	39,2%	4
NACA 4412	37,2%	4,5	38,9%	4
NACA 4414	35,7%	4,5	38,7%	3,5
NACA 5412	33,6%	4,5	38,5%	3,5

B. Perbandingan bilah *taper* dan *taper less*.

Pada bagian ini akan membahas performa bilah *taper* yang telah disimulasikan pada perangkat lunak Qblade v.0.963 dengan parameter yang diinginkan yaitu ingin mengetahui *coefision of power* (C_p) yang di dapat dari grafik hubungan antara C_p terhadap TSR yang dapat dilihat pada tabel 4 – 24 diatas dengan nilai C_p masing masing untuk karakteristik *airfoil* yang digunakan. Sebagai data pendukung maka di sajikan juga data daya yang diperoleh dari masing-masing bilah dengan karakteristik *airfoil*nya yang dapat dilihat pada tabel 4 – 25 dibawah ini, yang merupakan daya yang dihasilkan dari simulasi menggunakan perangkat lunak tersebut.

Tabel 4 - 25 Daya yang dihasilkan

Jenis <i>airfoil</i>	Bilah <i>taper</i>	Bilah <i>taper less</i>
NACA 3412	613,82 W	605,14 W
NACA 4410	634,80 W	607,23 W
NACA 4412	576,10 W	603,09 W
NACA 4414	553,31 W	597,02 W
NACA 5412	521,02 W	598,87 W

Adapun perbandingan pada penelitian ini dengan menggunakan variasi *thickness* dan *chamber* yang dapat dilihat pada tabel 4 – 26 dan 4 – 27 dibawah ini dengan performa masing-masing bilah dengan karakteristik *airfoil* yang digunakan.

Tabel 4 - 26 Performa bilah dengan variasi *chamber airfoil*

Jenis <i>airfoil</i>	Bilah <i>taper</i>		Bilah <i>taper less</i>	
	C_p	Daya yang dihasilkan	C_p	Daya yang dihasilkan
3412	39,6%	613,82 W	39,1%	605,14 W
4412	37,2%	576,10 W	38,9%	603,09 W
5412	33,6%	521,02 W	38,7%	598,87 W

Tabel 4 - 27 Performa bilah dengan variasi *thickness airfoil*

Jenis <i>airfoil</i>	Bilah <i>taper</i>		Bilah <i>taper less</i>	
	C_p	Daya yang dihasilkan	C_p	Daya yang dihasilkan
4410	37,7%	634,80 W	39,2%	607,23 W
4412	37,2%	576,10 W	38,9%	603,09 W
4414	33,7%	553,31 W	38,5%	598,87 W

Pada kedua tabel 4 – 26 dan 4 – 27 diatas, dapat dilihat bahwa bilah dengan variasi *chamber* dan *thickness* pada *airfoil* yang digunakan dapat mempengaruhi performa akhir dari bilah-bilah yang telah dirancang tersebut. Sehingga dari kedua tabel diatas dapat diketahui bahwa semakin kecil *chamber* dan *thickness* yang digunakan pada sebuah *airfoil* maka semakin besar daya C_p yang dihasilkan.

Dapat dilihat bahwa pada bilah dengan variasi *chamber* diperoleh hasil C_p tertinggi pada bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 3412 sebesar 39,6% dan pada bilah dengan variasi *thickness* diperoleh C_p tertinggi pada bilah *taperless* dengan *airfoil* NACA 4410 sebesar 37,7%. Dalam sebuah perancangan bilah, untuk menentukan bilah tersebut memiliki performa terbaik dapat ditentukan dari nilai C_p tersebut, bukan dari daya (W) yang diperoleh dari perangkat lunak tersebut. Karena daya tersebut merupakan daya teoritis dari perangkat lunak, sedangkan daya yang diinginkan berasal dari daya aktual ketika bilah tersebut sudah dibuat dan diaplikasikan kedalam *wind turbine* TSD tersebut. daya yang dihasilkan dari simulasi penelitian menghasilkan daya yang lebih besar dari daya dirancang awal.

C. Validasi data penelitian dengan data aktual

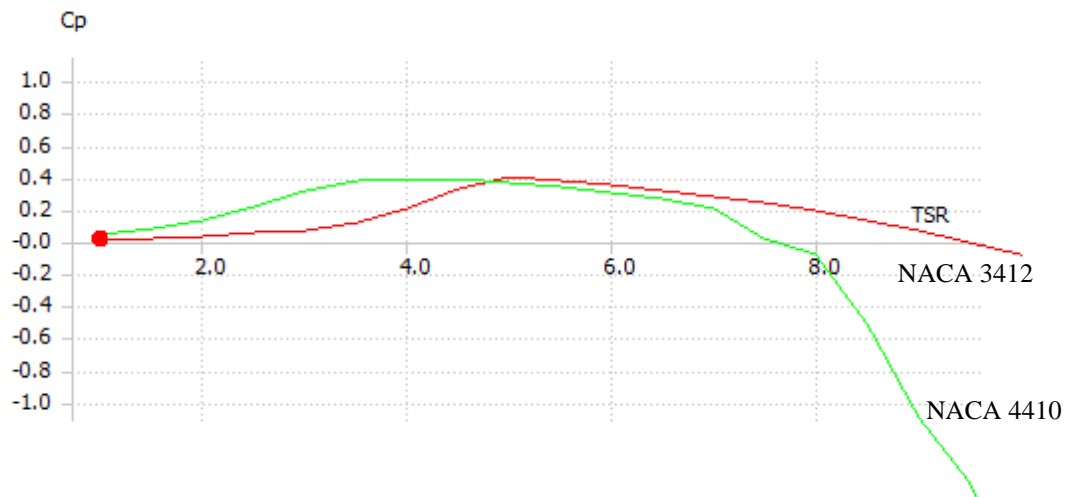
Validasi data penelitian yang ingin diujikan adalah apakah hasil dari nilai performa C_p masing-masing jenis *airfoil* dan bilahnya akan berubah apabila parameter kecepatan angin maksimalnya menggunakan data aktual atau terbaru? mengapa kecepatan angin maksimalnya saja yang diubah? karena kecepatan angin ini merupakan parameter penting dalam sebuah sistem pltb. Kecepatan angin dapat menentukan seberapa efisien pltb tersebut dalam menghasilkan listrik, apabila tidak sesuai target yang diinginkan maka akan rugi apabila didaerah tersebut untuk dibangun pltb. Oleh karena itu tidak semua tempat ataupun daerah cocok untuk dibangun sebuah pltb.

Data pembandingan yang digunakan sebagai validasi data berupa data dari hasil rekaman Stasiun Klimatologi Yogyakarta Internasional Airport (YIA) dan Stasiun Klimatologi Sleman. Data-data tersebut direkam pada periode september 2019 untuk stasiun klimatologi Sleman dan Mei 2021 untuk stasiun klimatologi YIA dengan parameter data yang diambil kecepatan angin maksimal perhari dalam 1 bulan yang akan dilampirkan pada lampiran tugas akhir ini.

Pada penelitian ini didapatkan bahwa performa C_p terbaik didapatkan bilah terbaik dengan variasi *chamber* diperoleh hasil C_p tertinggi pada bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 3412 sebesar 39,6% dan pada bilah dengan variasi *thickness* diperoleh C_p tertinggi pada bilah *taperless* dengan *airfoil* NACA 4410 sebesar 37,7%. Dengan melakukan validasi, peneliti ingin mengetahui apakah perolehan nilai C_p tersebut akan berubah jika menggunakan data dari kecepatan angin maksimal yang diperoleh dari BMKG.

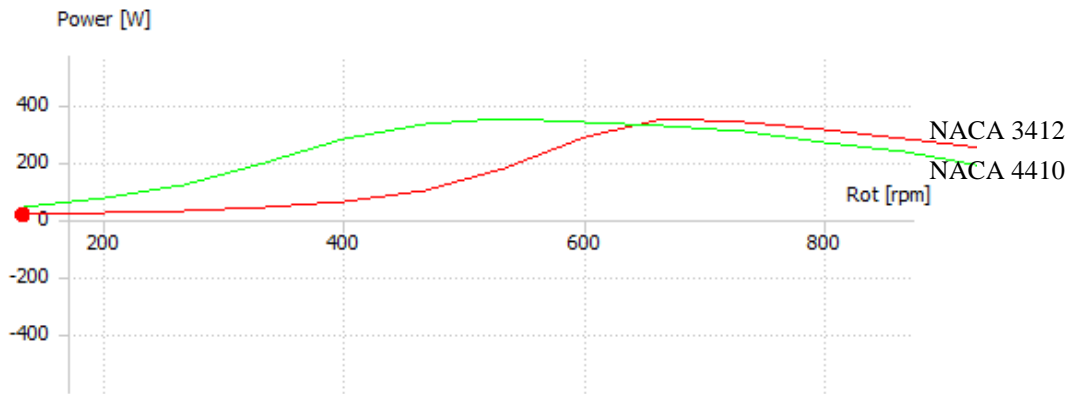
Berdasarkan data yang diperoleh dari BMKG, untuk pada bulan september 2019 dengan Stasiun Klimatologi Sleman diperoleh data kecepatan angin maksimal yang tertinggi sebesar 6,17 m/s dan yang terendah sebesar 3,6 m/s. lalu pada bulan Mei 2021 Stasiun Klimatologi YIA diperoleh data kecepatan angin maksimal yang tertinggi sebesar 9,77 m/s dan yang terendah 3,6 m/s. pada penelitian ini data kecepatan angin maksimal yang digunakan sebagai bahan validasi adalah kecepatan angin maksimal yang tertinggi yang diperoleh dalam 1 bulan tersebut. Selanjutnya data kecepatan angin yang diperoleh dari BMKG tersebut akan disimulasikan kedalam perangkat lunak Qblade V.0.963 dengan

objek penelitian yang sama yaitu bilah jenis *taper less* dan *taper* dengan *airfoil* berjenis NACA 3412, 4410.

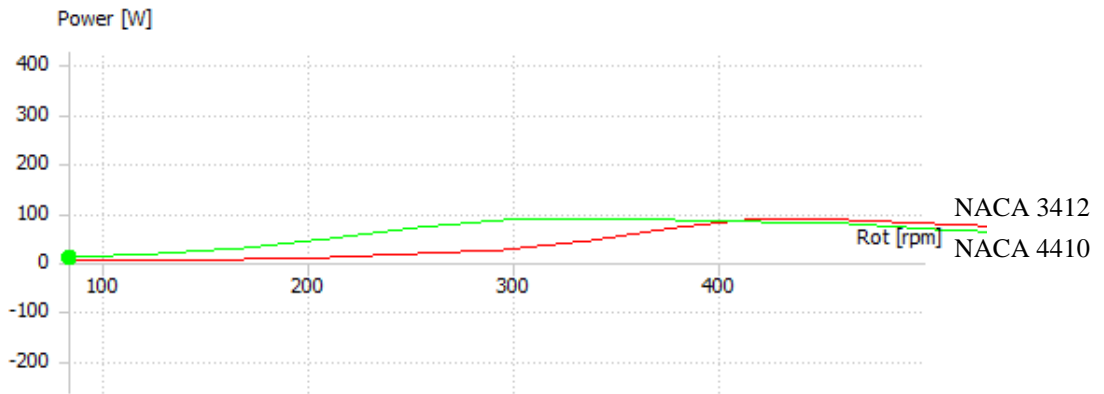


Gambar 4 - 11 Grafik Cp validasi

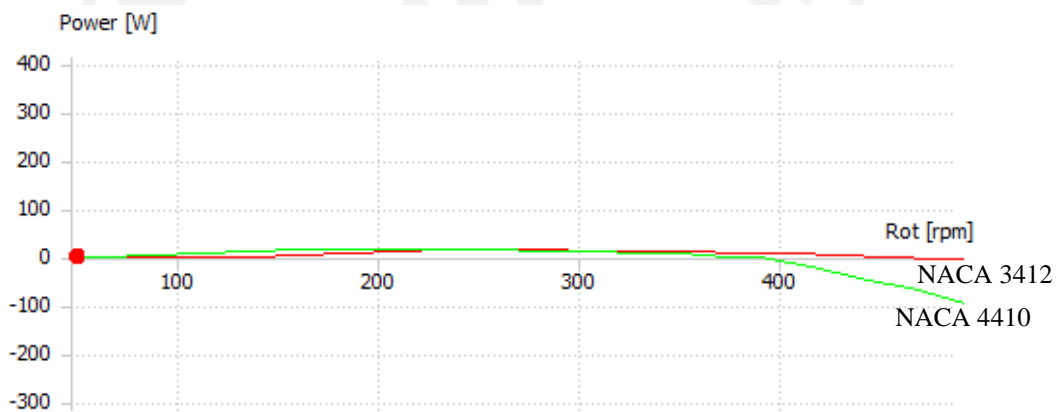
Gambar 4 -11 diatas merupakan grafik hasil nilai Cp simulasi teoritis menggunakan perangkat lunak Qblade V. 0.963 dengan objek simulasi *taper* NACA 3412 dan *taper less* NACA 4410 dengan kecepatan angin 9,77 m/s, 6,17 m/s, dan 3,6 m/s. Setelah dilakukan simulasi dengan ketiga data kecepatan angin tersebut, didapatkan nilai Cp yang sama. Dari ketiga kecepatan angin tersebut menghasilkan nilai Cp untuk jenis *taper* NACA 3412 sebesar 39,6 % dan jenis *taper less* NACA 4410 sebesar 37,7 %. Sehingga kedua jenis bilah tersebut memiliki nilai Cp yang tidak berubah apabila dihadapkan dengan kondisi kecepatan angin yang berbeda atau memiliki nilai daya serap energi angin yang konstan.



Gambar 4 - 12 Daya perolehan teoritis kecepatan angin 9,77 m/s



Gambar 4 - 13 Daya perolehan teoritis kecepatan angin 6,17 m/s



Gambar 4 - 14 Daya perolehan teoritis kecepatan angin 3,6 m/s

Pada gambar 4 – 12 sampai dengan 4 – 14 diatas menunjukkan hasil perolehan daya teoritis dalam satuan watt dengan masing-masing kecepatan anginnya.

Tabel 4 - 28 Perolehan daya teoritis

Kecepatan Angin(m/s)	Perolehan Daya (w)	
	<i>Taper NACA 3412</i>	<i>Taper less NACA 4410</i>
3,6	17,44	17,25
6,17	87,8	86,8
9,77	348,4	344,7

Tabel 4 – 28 diatas dapat dilihat perolehan daya dalam satuan watt dengan kondisi kecepatan angin dan tempat yang berbeda. Pada tabel tersebut, masing-masing bilah menghasilkan daya listrik dibawah 500 watt (<500 W). Untuk turbin angin TSD dapat menghasilkan hingga maksimal daya *output* hingga 500 watt. Sehingga dengan daya dari paling terendah 17-watt sudah bisa untuk menyalakan lampu rumah, lampu jalanan, mengecas hp dan lain-lainnya. Hanya saja dengan kondisi kecepatan angin tersebut, turbin angin TSD tidak dapat menghasilkan daya hingga maksimal *output*nya.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berikut ini merupakan kesimpulan yang didapatkan pada penelitian ini:

1. Telah dirancang bilah dengan karakteristik *airfoil* yang memiliki variasi *thickness* dan *chamber* yang berbeda-beda dengan jenis bilah *taper* dan *taper less*.
2. Dari penelitian bilah dengan variasi *chamber* dan *thickness* pada *airfoil*, diketahui bahwa variasi tersebut dapat mempengaruhi performa akhir dari bilah-bilah yang telah dirancang.
3. Dari hasil penelitian tersebut, didapatkan bilah yang optimal dengan karakteristik *airfoil* pada masing-masing jenis bilah, untuk bilah dengan jenis *taper* menggunakan *airfoil* NACA 3412 memperoleh nilai C_p sebesar 39,6% sedangkan untuk bilah dengan jenis *taper less* menggunakan *airfoil* NACA 4410 memperoleh nilai C_p sebesar 39,2%.
4. Hasil nilai C_p validasi dengan kondisi angin yang berbeda tidak merubah nilai daya serap energi angin dari bilah tersebut.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

Adapun saran pada penelitian selanjutnya sebagai berikut:

1. Diharapkan untuk penelitian selanjutnya dapat membandingkan bilah dengan tiga jenis bilah yang pada umumnya digunakan.
2. Diharapkan untuk penelitian selanjutnya dapat menambahkan jenis *airfoil* lainnya agar mendapatkan hasil yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfaridzi, M. A., dan Setiawan, R. 2020. “*Analisis Performa Bilah Taperless Dengan Airfoil NACA 4412 Pada Horizontal Axis Wind Turbine TSD 500 Di PT Lentera Bumi Nusantara.*” *Jurnal Teknik Mesin Dan Pembelajaran* Volume 3:64–73.
- C. Bak. 2011. “*Wind Energy Systems.*” United Kingdom: Woodhead publishing.
- Dahlan, B. 2016. “*Rancang Bangun Baling-Baling Kincir Angin Menggunakan Naca 4412 Dan 4415 Dari Bahan Kayu Mahoni (Swietenia Macrophylla) Dan Pinus (Pinus Merkusii).*” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Dan Zhao, Han, N., Goh, E., Cater, J., dan Reinecke, A. 2019. “*Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters*”. Academic Press.
- Gudmundsson, S. 2014. “*The Anatomy of the Airfoil.*” Pp. 235–97 in *General Aviation Aircraft Design*. Elsevier.
- Hanif, Ibrahim, dan Jatisukamto, G. 2017. “*Pengaruh Sudut Tekuk (Cant) Winglet Menggunakan Airfoil Naca 2215 Pada Aerodinamika Sayap Pesawat.*” (3):5.
- Ikuyama, I. 2013. *Pengantar teknik kincir angin*. Jepang: Hiromi Publishing Co., Ltd.
- Kuntara, Y. 2020. “*Rancang Bangun Bilah Turbin Angin Sumbu Horizontal Skala Mikro.*”
- Madi, Tuswan, Arirohman, I. D., dan Ismail, A. 2021. “*Comparative Analysis of Taper and Taperless Blade Design for Ocean Wind Turbines in Ciheras Coastline, West Java.*” *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Kelautan* 18(1):8–17. doi: 10.14710/kapal.v18i1.32486.
- Nuraini, A., Abadi, C. S., dan Fachruddin. 2019. “*Analisis Perbandingan Bilah Turbin Angin Jenis Taper Dengan Taperless Pada Turbin Angin Skala Mikro Di PT. Lentera Bumi Nusantara.*” *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*.
- Nuraini, A., Abadi, C. S. dan Fachruddin. 2019. “*Perbandingan Desain Dan Performa Bilah Turbin Angin Jenis Taper Dengan Taperless Di Pt. Lentera Bumi Nusantara.*” *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin* 138–46.
- Rachman, Arfidian, Pratiwi, dan Ashari, L. 2019. “*Rancang Bangun Dan Uji Prestasi Horizontal Axis Wind Turbine Jenis Taper.*” 9. doi: doi.10.21063/JTM.2019.v9i2.58-63.

- Salameh, Z. 2014. "Wind Energy Conversion Systems." Pp. 115–99 in *Renewable Energy System Design*. Elsevier.
- Schubel, Peter J., and Richard J. Crossley. 2012. "Wind Turbine Blade Design." *Energies* 5(9):3425–49. doi: 10.3390/en5093425.
- Silitonga, A. S., dan Ibrahim, H. 2020. "Buku Ajar Energi Baru Dan Terbarukan". Sleman: Deepublish.
- Simamora R. P., Handarto, dan Saukat, M. 2019. "Analisis Potensi Energi Angin Dan Analisis Teknik Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Untuk Membangkitkan Energi Listrik (Studi Kasus Di Gunung Kincir, Desa Ciheras Kecamatan Cipatujah Kabupaten Tasikmalaya)." (Seminar Nasional Teknik Elektro 2019):91–100.
- Sinaga, N. 2017. "Analisis Aliran Pada Rotor Turbin Angin Sumbu Horizontal Menggunakan Pendekatan Komputasional." *Jurnal Teknik Energi* 13(3):8.
- Suresh, A., and S. Rajakumar. 2019. "Design of Small Horizontal Axis Wind Turbine for Low Wind Speed Rural Applications." *Materials Today: Proceedings*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.008>.
- Syahyuniar, R., Ningsih, Y., dan Herianto. 2018. "Rancang Bangun Blade Turbin Angin Tipe Horizontal." 5.
- W. A. Timmer and C. Bak. 2013. "Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials". United Kingdom: Woodhead publishing.
- Wood, D. 2011. "Small Wind Turbines". London: Springer London.

LAMPIRAN 1

PERANCANGAN BILAH TASH TAPELESS DAN TAPER

A. Perancangan jari-jari rencana

1. Perhitungan sistem turbin (persamaan 2.2)

$$K = \eta_b \times \eta_g \times \eta_t \times \eta_k$$
$$K = 0,4 \times 0,9 \times 1 \times 0,9$$
$$K = 0,341$$

2. Perhitungan daya angin perolehan (persamaan 2.1)

$$Pa = \frac{p_l}{K}$$
$$Pa = \frac{500 \text{ watt}}{0,341}$$
$$Pa = 1543,21 \text{ watt}$$

3. Perhitungan luas sapuan area *blade rotor* (persamaan 2.4)

$$A = \frac{2p_a}{\rho \times v_{maks}^3}$$
$$A = \frac{2 \times 1543,21 \text{ watt}}{1,225 \text{ kg/m}^3 \times 11,8 \text{ m/s}}$$
$$A = 1,53 \text{ m}^2$$

4. Perhitungan jari-jari yang digunakan (persamaan 2.5)

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$
$$R = \sqrt{\frac{1,53 \text{ m}^2}{\pi}}$$
$$R = 0,7 \text{ m}$$

B. Pemilihan *airfoil*

1. Perhitungan bilangan reynolds (persamaan 2.3)

$$Re = \frac{Vl}{\nu}$$

$$Re = \frac{11,8 \text{ m/s} \cdot 0,12 \text{ m}}{1,46 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Re = 96.986$$

C. Perancangan geometri

1. Perancangan bilah *taper less*.

a. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4412.

- Perhitungan mencari jari-jari parsial (persamaan 2.6)

$$r_{\text{parsial ke-1}} = 0,17 + \left[\left(\frac{R - 0,17}{n} \right) x(\text{elemen}) \right]$$

$$r_{\text{parsial ke-1}} = 0,17 + \left[\left(\frac{0,7 - 0,17}{10} \right) x(1) \right]$$

$$r_{\text{parsial ke-1}} = 0,22 \text{ m}$$

Sehingga dengan rumus yang sama untuk mencari jari-jari parsial pada elemen selanjutnya

$$\text{Elemen ke-2} = 0,28$$

$$\text{Elemen ke-3} = 0,33$$

$$\text{Elemen ke-4} = 0,38$$

$$\text{Elemen ke-5} = 0,44$$

$$\text{Elemen ke-6} = 0,49$$

$$\text{Elemen ke-7} = 0,54$$

$$\text{Elemen ke-8} = 0,59$$

$$\text{Elemen ke-9} = 0,65$$

$$\text{Elemen ke-10} = 0,70$$

- Mencari *Tip Speed Ratio* parsial (persamaan 2.7)

$$\lambda r = \frac{r}{R} \lambda R$$

$$\lambda r_{\text{elemen ke-0}} = \frac{0,17 \text{ m}}{0,7 \text{ m}} \cdot 7$$

$$\lambda r_{\text{elemen ke-0}} = 1,7$$

Sehingga dengan rumus yang sama untuk mencari TSR parsial pada elemen selanjutnya

$$\text{Elemen ke-1} = 2,2$$

$$\text{Elemen ke-2} = 2,8$$

Elemen ke-3 = 3,3

Elemen ke-4 = 3,8

Elemen ke-5 = 4,4

Elemen ke-6 = 4,9

Elemen ke-7 = 5,4

Elemen ke-8 = 5,9

Elemen ke-9 = 6,5

Elemen ke-10 = 7,0

- Mencari *flow angle* parsial (persamaan 2.9)

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda r}$$

$$\phi_{\text{elemen ke-0}} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{1,7}$$

$$\phi_{\text{elemen ke-0}} = 20,310^\circ$$

Sehingga dengan rumus yang sama untuk mencari *flow angle* parsial pada elemen selanjutnya

Elemen ke-1 = 16,102

Elemen ke-2 = 13,278

Elemen ke-3 = 11,278

Elemen ke-4 = 9,780

Elemen ke-5 = 8,631

Elemen ke-6 = 7,720

Elemen ke-7 = 6,982

Elemen ke-8 = 6,371

Elemen ke-9 = 5,587

Elemen ke-10 = 5,420

- Mencari nilai *Cl* tiap elemen (persamaan 2.8)

$$Cr = \frac{(16\pi \times R \times \left(\frac{R}{r}\right))}{9 \times \lambda R^2 \times B \times Cl}$$

$$Cl_{\text{elemen ke-0}} = \frac{(16\pi \times R \times \left(\frac{R}{r}\right))}{9 \times \lambda R^2 \times B \times Cr}$$

$$Cl_{\text{elemen ke-0}} = \frac{(16\pi \times 0,7m \times \left(\frac{0,7m}{0,17m}\right))}{9 \times 7^2 \times 3 \times 0,12m}$$

$$Cl_{\text{elemen ke-0}} = 1,17$$

Sehingga dengan rumus yang sama untuk mencari Cl parsial pada elemen selanjutnya

$$\text{Elemen ke-1} = 0,89$$

$$\text{Elemen ke-2} = 0,72$$

$$\text{Elemen ke-3} = 0,61$$

$$\text{Elemen ke-4} = 0,52$$

$$\text{Elemen ke-5} = 0,46$$

$$\text{Elemen ke-6} = 0,41$$

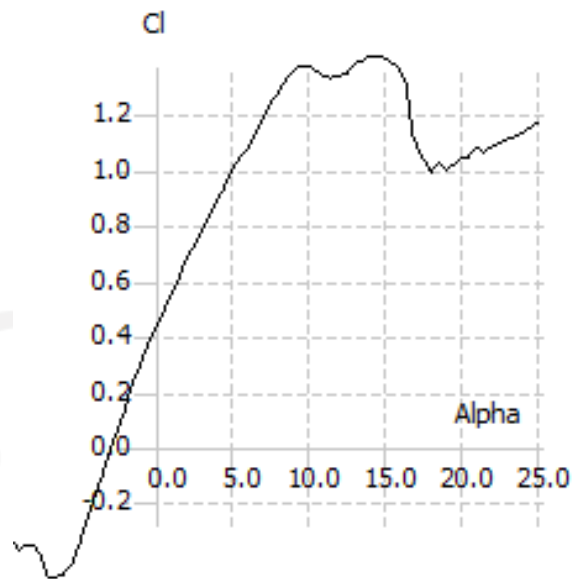
$$\text{Elemen ke-7} = 0,37$$

$$\text{Elemen ke-8} = 0,34$$

$$\text{Elemen ke-9} = 0,31$$

$$\text{Elemen ke-10} = 0,28$$

- mencari nilai *alpha* pada kurva Cl terhadap *alpha*
 nilai-nilai ini hanya bisa didapatkan dari kurva Cl terhadap *alpha* dengan mengambil nilai tegak lurus dari nilai Cl yang didapat pada perhitungan sebelumnya dan kurva tersebut terdapat pada gambar dibawah ini.



Dari gambar diatas tersebut maka diperoleh nilai *alpha* pada elemen-elemen berikut ini

Elemen ke-0 = 6,85

Elemen ke-1 = 4,08

Elemen ke-2 = 2,47

Elemen ke-3 = 1,52

Elemen ke-4 = 0,72

Elemen ke-5 = 0,17

Elemen ke-6 = -0,19

Elemen ke-7 = -0,43

Elemen ke-8 = -0,64

Elemen ke-9 = -0,86

Elemen ke-10 = -1,07

- mencari nilai sudut puntir (persamaan 2.10)

$$\beta_{elemen\ ke-0} = \phi - \alpha$$

$$\beta_{elemen\ ke-0} = 20,310^{\circ} - 6,85^{\circ}$$

$$\beta_{elemen\ ke-0} = 13,460^{\circ}$$

Sehingga dengan rumus yang sama untuk mencari sudut puntir parsial pada elemen selanjutnya

Elemen ke-1 = 12,022

Elemen ke-2 = 10,808

Elemen ke-3 = 9,751

Elemen ke-4 = 9,058

Elemen ke-5 = 8,461

Elemen ke-6 = 7,905

Elemen ke-7 = 7,412

Elemen ke-8 = 7,006

Elemen ke-9 = 6,712

Elemen ke-10 = 6,490

- Data perancangan bilah *taper less* NACA 4412.

Elemen (<i>n</i>)	Jari-jari Parsial (<i>r</i>)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	CL	<i>Alpha</i> parsial (α)	<i>Twist</i> parsial (β)
0	0,17 m	1,7	20,310°	1,17	6,85°	13.460°
1	0,22 m	2,2	16,102°	0,89	4,08°	12.022°
2	0,28 m	2,8	13,278°	0,72	2,47°	10.808°
3	0,33 m	3,3	11,271°	0,61	1,52°	9.751°
4	0,38 m	3,8	9,780°	0,52	0,72°	9.058°
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,46	0,17°	8.461°
6	0,49 m	4,9	7,720°	0,41	-0.19°	7.905°
7	0,54 m	5,4	6,982°	0,37	-0.43°	7.412°
8	0,59 m	5,9	6,371°	0,34	-0.64°	7.006°
9	0,65 m	6,5	5,857°	0,31	-0.86°	6.712°
10	0,70 m	7,0	5,420°	0,28	-1.07°	6.490°

b. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 3412.

- Data perancangan bilah *taper less* NACA 3412.

Elemen (n)	Jari-jari Parsial (r)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	CL	<i>Alpha</i> parsial (α)	<i>Twist</i> parsial (β)
0	0,17 m	1,7	20,310°	1,17	8,55°	11,760°
1	0,22 m	2,2	16,102°	0,89	4,98°	11,127°
2	0,28 m	2,8	13,278°	0,72	3,28°	10,003°
3	0,33 m	3,3	11,271°	0,61	2,28°	8,991°
4	0,38 m	3,8	9,780°	0,52	1,48°	8,305°
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,46	0,95°	7,686°
6	0,49 m	4,9	7,720°	0,41	0,52°	7,200°
7	0,54 m	5,4	6,982°	0,37	0,20°	6,782°
8	0,59 m	5,9	6,371°	0,34	-0,05°	6,421°
9	0,65 m	6,5	5,857°	0,31	-0,28°	6,132°
10	0,70 m	7,0	5,420°	0,28	-0,49°	5,910°

c. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 5412.

- Data perancangan bilah *taper less* NACA 5412.

Elemen (n)	Jari-jari Parsial (r)	TSR parsial (λr)	<i>Flow angle</i> parsial (ϕ)	CL	<i>Alpha</i> parsial (α)	<i>Twist</i> parsial (β)
0	0,17 m	1,7	20,310°	1,17	5,95°	14,360°
1	0,22 m	2,2	16,102°	0,89	3,45°	12,652°
2	0,28 m	2,8	13,278°	0,72	1,60°	11,678°
3	0,33 m	3,3	11,271°	0,61	0,72°	10,551°
4	0,38 m	3,8	9,780°	0,52	-0,04°	9,820°
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,46	-0,44°	9,071°
6	0,49 m	4,9	7,720°	0,41	-0,90°	8,620°
7	0,54 m	5,4	6,982°	0,37	-1,19°	8,172°
8	0,59 m	5,9	6,371°	0,34	-1,37°	7,741°
9	0,65 m	6,5	5,857°	0,31	-1,56°	7,417°
10	0,70 m	7,0	5,420°	0,28	-1,80°	7,220°

d. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4410.

- Data perancangan bilah *taper less* NACA 4410.

Elemen (n)	Jari-jari Parsial (r)	TSR parsial (λr)	<i>Flow angle parsial</i> (ϕ)	CL	<i>Alpha</i> parsial (α)	<i>Twist</i> parsial (β)
0	0,17 m	1,7	20,310°	1,17	6,80°	13,510°
1	0,22 m	2,2	16,102°	0,89	4,00°	12,102°
2	0,28 m	2,8	13,278°	0,72	2,48°	10,798°
3	0,33 m	3,3	11,271°	0,61	1,46°	9,811°
4	0,38 m	3,8	9,780°	0,52	0,76°	9,020°
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,46	0,35°	8,281°
6	0,49 m	4,9	7,720°	0,41	-0,03°	7,750°
7	0,54 m	5,4	6,982°	0,37	-0,31°	7,292°
8	0,59 m	5,9	6,371°	0,34	-0,53°	6,896°
9	0,65 m	6,5	5,857°	0,31	-0,73°	6,587°
10	0,70 m	7,0	5,420°	0,28	-0,92°	6,340°

e. Perancangan bilah *taper less* dengan *airfoil* NACA 4414.

- Data perancangan bilah *taper less* NACA 4414.

Elemen (<i>n</i>)	Jari-jari Parsial (<i>r</i>)	TSR parsial (<i>λr</i>)	<i>Flow angle parsial (φ)</i>	CL	<i>Alpha parsial (α)</i>	<i>Twist parsial (β)</i>
0	0,17 m	1,7	20,310°	1,17	7,02°	13,290°
1	0,22 m	2,2	16,102°	0,89	4,19°	11,912°
2	0,28 m	2,8	13,278°	0,72	2,52°	10,758°
3	0,33 m	3,3	11,271°	0,61	1,52°	9,751°
4	0,38 m	3,8	9,780°	0,52	0,63°	9,155°
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,46	0,14°	8,491°
6	0,49 m	4,9	7,720°	0,41	-0,32°	8,040°
7	0,54 m	5,4	6,982°	0,37	-0,59°	7,572°
8	0,59 m	5,9	6,371°	0,34	-0,72°	7,091°
9	0,65 m	6,5	5,857°	0,31	-0,84°	6,697°
10	0,70 m	7,0	5,420°	0,28	-0,96°	6,380°

2. Perancangan bilah *taper*

a. Perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 4412.

- Perhitungan mencari jari-jari parsial (persamaan 2.6)

$$r_{\text{parsial ke-1}} = 0,17 + \left[\left(\frac{R - 0,17}{n} \right) x(\text{elemen}) \right]$$

$$r_{\text{parsial ke-1}} = 0,17 + \left[\left(\frac{0,7 - 0,17}{10} \right) x(1) \right]$$

$$r_{\text{parsial ke-1}} = 0,22 \text{ m}$$

Sehingga dengan rumus yang sama untuk mencari jari-jari parsial pada elemen selanjutnya

Elemen ke-2 = 0,28

Elemen ke-3 = 0,33

Elemen ke-4 = 0,38

Elemen ke-5 = 0,44

Elemen ke-6 = 0,49

Elemen ke-7 = 0,54

Elemen ke-8 = 0,59

Elemen ke-9 = 0,65

Elemen ke-10 = 0,70

- Mencari *Tip Speed Ratio* parsial (persamaan 2.7)

$$\lambda r = \frac{r}{R} \lambda R$$

$$\lambda r_{\text{elemen ke-0}} = \frac{0,17 \text{ m}}{0,7 \text{ m}} 7$$

$$\lambda r_{\text{elemen ke-0}} = 1,7$$

Sehingga dengan rumus yang sama untuk mencari TSR parsial pada elemen selanjutnya

Elemen ke-1 = 2,2

Elemen ke-2 = 2,8

Elemen ke-3 = 3,3

Elemen ke-4 = 3,8

Elemen ke-5 = 4,4

Elemen ke-6 = 4,9

Elemen ke-7 = 5,4

Elemen ke-8 = 5,9

Elemen ke-9 = 6,5

Elemen ke-10 = 7,0

- Mencari *flow angle* parsial (persamaan 2.9)

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda r}$$

$$\phi_{\text{elemen ke-0}} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{1,7}$$

$$\phi_{\text{elemen ke-0}} = 20,310^\circ$$

Sehingga dengan rumus yang sama untuk mencari *flow angle* parsial pada elemen selanjutnya

Elemen ke-1 = 16,102

Elemen ke-2 = 13,278

Elemen ke-3 = 11,278

Elemen ke-4 = 9,780

Elemen ke-5 = 8,631

Elemen ke-6 = 7,720

Elemen ke-7 = 6,982

Elemen ke-8 = 6,371

Elemen ke-9 = 5,587

Elemen ke-10 = 5,420

- Mencari sudut puntir parsial (persamaan 2.10)

$$\beta_{elemen\ ke-0} = \phi - \alpha$$

$$\beta_{elemen\ ke-0} = 20,31 - 9$$

$$\beta_{elemen\ ke-0} = 11.31$$

Sehingga dengan rumus yang sama untuk mencari sudut puntir parsial pada elemen selanjutnya

Elemen ke-1 = 7.10

Elemen ke-2 = 4.28

Elemen ke-3 = 2.27

Elemen ke-4 = 0.78

Elemen ke-5 = -0.37

Elemen ke-6 = -1.28

Elemen ke-7 = -2.02

Elemen ke-8 = -2.63

Elemen ke-9 = -3.14

Elemen ke-10 = -3.58

- Mencari nilai *Chord* tiap elemen (persamaan 2.8)

$$Cr = \frac{(16\pi \times R \times \left(\frac{R}{r}\right))}{9 \times \lambda R^2 \times B \times Cl}$$

$$Cr_{elemen\ ke-0} = \frac{(16\pi \times R \times \left(\frac{R}{r}\right))}{9 \times \lambda R^2 \times B \times Cl}$$

$$Cr_{elemen\ ke-0} = \frac{(16\pi \times 0,7 \times \left(\frac{0,7}{1,7}\right))}{9 \times 7^2 \times 3 \times 1,35}$$

$$Cr_{elemen\ ke-0} = 0.081$$

Sehingga dengan rumus yang sama untuk mencari *chord* parsial pada elemen selanjutnya

$$\text{Elemen ke-1} = 0.062$$

$$\text{Elemen ke-2} = 0.050$$

$$\text{Elemen ke-3} = 0.042$$

$$\text{Elemen ke-4} = 0.036$$

$$\text{Elemen ke-5} = 0.032$$

$$\text{Elemen ke-6} = 0.028$$

$$\text{Elemen ke-7} = 0.025$$

$$\text{Elemen ke-8} = 0.023$$

$$\text{Elemen ke-9} = 0.021$$

$$\text{Elemen ke-10} = 0.020$$

- Menambah nilai *chord* pada elemen ke-0 agar 0.12 (+0.039) untuk semua elemen.

$$\text{Elemen ke-0} = 0.12$$

$$\text{Elemen ke-1} = 0.101$$

$$\text{Elemen ke-2} = 0.089$$

$$\text{Elemen ke-3} = 0.081$$

$$\text{Elemen ke-4} = 0.075$$

$$\text{Elemen ke-5} = 0.071$$

$$\text{Elemen ke-6} = 0.067$$

$$\text{Elemen ke-7} = 0.064$$

$$\text{Elemen ke-8} = 0.062$$

$$\text{Elemen ke-9} = 0.060$$

$$\text{Elemen ke-10} = 0.059$$

- Data perancangan bilah *taper* NACA 4412.

Elemen (n)	Jari-jari Parsial (r)	TSR parsial (λr)	<i>Flow angle</i> parsial (ϕ)	<i>Twist</i> parsial (β)	<i>Chord</i> parsial (Cr)
0	0,17 m	1,7	20,310°	11,31°	0,120 m
1	0,22 m	2,2	16,102°	7,10°	0,101 m
2	0,28 m	2,8	13,278°	4,28°	0,089 m
3	0,33 m	3,3	11,271°	2,27°	0,081 m
4	0,38 m	3,8	9,780°	0,78°	0,075 m
5	0,44 m	4,4	8,631°	-0,37°	0,071 m
6	0,49 m	4,9	7,720°	-1,28°	0,067 m
7	0,54 m	5,4	6,982°	-2,02°	0,064 m
8	0,59 m	5,9	6,371°	-2,63°	0,062 m
9	0,65 m	6,5	5,857°	-3,14°	0,060 m
10	0,70 m	7,0	5,420°	-3,58°	0,059 m

b. Perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 3412.

- Data perancangan bilah *taper less* NACA 3412.

Elemen (n)	Jari-jari Parsial (r)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	<i>Twist</i> parsial (β)	<i>Chord</i> parsial (Cr)
0	0,17 m	1,7	20,310°	12,31°	0,120 m
1	0,22 m	2,2	16,102°	8,10°	0,098 m
2	0,28 m	2,8	13,278°	5,28°	0,084 m
3	0,33 m	3,3	11,271°	3,27°	0,074 m
4	0,38 m	3,8	9,780°	1,78°	0,068 m
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,63°	0,063 m
6	0,49 m	4,9	7,720°	-0,28°	0,059 m
7	0,54 m	5,4	6,982°	-1,02°	0,055 m
8	0,59 m	5,9	6,371°	-1,63°	0,053 m
9	0,65 m	6,5	5,857°	-2,14°	0,051 m
10	0,70 m	7,0	5,420°	-2,58°	0,049 m

c. Perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 5412.

- Data perancangan bilah *taper less* NACA 5412.

Elemen (n)	Jari-jari Parsial (r)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	<i>Twist</i> parsial (β)	<i>Chord</i> parsial (Cr)
0	0,17 m	1,7	20,310°	10,31°	0,120 m
1	0,22 m	2,2	16,102°	6,10°	0,103 m
2	0,28 m	2,8	13,278°	3,28°	0,092 m
3	0,33 m	3,3	11,271°	1,27°	0,085 m
4	0,38 m	3,8	9,780°	-0,22°	0,080 m
5	0,44 m	4,4	8,631°	-1,37°	0,076 m
6	0,49 m	4,9	7,720°	-2,28°	0,073 m
7	0,54 m	5,4	6,982°	-3,02°	0,071 m
8	0,59 m	5,9	6,371°	-3,63°	0,069 m
9	0,65 m	6,5	5,857°	-4,14°	0,067 m
10	0,70 m	7,0	5,420°	-4,58°	0,065 m

d. Perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 4410.

- Data perancangan bilah *taper less* NACA 4410.

Elemen (n)	Jari-jari Parsial (r)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	<i>Twist</i> parsial (β)	<i>Chord</i> parsial (Cr)
0	0,17 m	1,7	20,310°	12,31°	0,120 m
1	0,22 m	2,2	16,102°	8,10°	0,099 m
2	0,28 m	2,8	13,278°	5,28°	0,086 m
3	0,33 m	3,3	11,271°	3,27°	0,078 m
4	0,38 m	3,8	9,780°	1,78°	0,072 m
5	0,44 m	4,4	8,631°	0,63°	0,067 m
6	0,49 m	4,9	7,720°	-0,28°	0,063 m
7	0,54 m	5,4	6,982°	-1,02°	0,060 m
8	0,59 m	5,9	6,371°	-1,63°	0,058 m
9	0,65 m	6,5	5,857°	-2,14°	0,056 m
10	0,70 m	7,0	5,420°	-2,58°	0,054 m

e. Perancangan bilah *taper* dengan *airfoil* NACA 4414.

- Data perancangan bilah *taper less* NACA 4414.

Elemen (n)	Jari-jari Parsial (r)	TSR parsial (λr)	<i>Flow</i> <i>angle</i> parsial (ϕ)	<i>Twist</i> parsial (β)	<i>Chord</i> parsial (Cr)
0	0,17 m	1,7	20,310°	10,31°	0,120 m
1	0,22 m	2,2	16,102°	6,10°	0,102 m
2	0,28 m	2,8	13,278°	3,28°	0,091 m
3	0,33 m	3,3	11,271°	1,27°	0,083 m
4	0,38 m	3,8	9,780°	-0,22°	0,077 m
5	0,44 m	4,4	8,631°	-1,37°	0,073 m
6	0,49 m	4,9	7,720°	-2,28°	0,070 m
7	0,54 m	5,4	6,982°	-3,02°	0,067 m
8	0,59 m	5,9	6,371°	-3,63°	0,065 m
9	0,65 m	6,5	5,857°	-4,14°	0,063 m
10	0,70 m	7,0	5,420°	-4,58°	0,062 m

LAMPIRAN 2
DATA KECEPATAN ANGIN BADAN METEOROLOGI
KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA (BMKG)

DATA KECEPATAN ANGIN TERBESAR HARIAN (KNOT)

Nama Propinsi : DI YOGYAKARTA Lintang : 07° 43' 52.2" LS
 Nama Kabupaten : SLEMAN Bujur : 110° 21' 13.3" BT
 Tinggi : 182 m

Tanggal	Tahun 2019											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Des
1									9			
2									10			
3									11			
4									11			
5									11			
6									12			
7									11			
8									12			
9									10			
10									12			
11									9			
12									12			
13									8			
14									12			
15									10			
16									9			
17									10			
18									8			
19									9			
20									7			
21									7			
22									10			
23									10			
24									10			
25									9			
26									10			
27									9			
28									7			
29									10			
30									11			

DATA KECEPATAN ANGIN TERBESAR HARIAN (KNOT)

Nama Stasiun : Stasiun Meteorologi Kelas II Yogyakarta
Nama Kabupaten : Kulon Progo
Nama Provinsi : D.I. Yogyakarta
Lintang : -7,907458 LS **Bujur** : 110,05448 BT
Tinggi : 7 mdpl

Tanggal	Tahun 2021											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1					16							
2					11							
3					8							
4					7							
5					8							
6					11							
7					11							
8					13							
9					12							
10					15							
11					17							
12					19							
13					15							
14					15							
15					16							
16					16							
17					13							
18					8							
19					10							
20					12							
21					11							
22					10							
23					9							
24					11							
25					9							
26					12							
27					10							
28					13							
29					10							
30					10							
31					8							