

**TUGAS SARJANA
BIDANG KONVERSI ENERGI**

**PERANCANGAN BILAH HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE TIPE TAPERLESS DENGAN
AIRFOIL NACA 4412 DENGAN DAYA 500 WATT**

*Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Dalam
Menyelesaikan Program Strata Satu (S1) pada Jurusan
Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri
Universitas Bung Hatta*

Oleh :

Nama : Reza Hamulian
NPM : 1710017211050
Program Studi : Teknik Mesin



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS BUNG HATTA
PADANG
2021**

**LEMBARAN PENGESAHAN
TUGAS SARJANA**

**“PERANCANGAN BILAH HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE TIPE TAPERLESS
DENGAN AIRFOIL NACA 4412 DENGAN DAYA 500 WATT”**

*Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Dalam
Menyelesaikan Program Strata Satu (S1) pada Jurusan
Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri*

Universitas Bung

Hatta Oleh :

REZA HAMULIAN

1710017211050

Disetujui Oleh :

Pembimbing



Dr. Burmawi, S.T., M.Si.

NIDN : 0027126901

Diketahui Oleh :

Dekan

Fakultas Teknologi Industri



Prof. Dr. Eng. Reni Desmiarti, S.T., M.T

NIDN : 1012097403

Ketua

Jurusan Teknik Mesin



Dr. Ir. Yovial Mahvoeddin RD., M.T.

NIDN : 1013036202

**LEMBARAN PERSETUJUAN
TUGAS SARJANA**

**“PERANCANGAN BILAH HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE TIPE TAPERLESS
DENGAN AIRFOIL NACA 4412 DENGAN DAYA 500 WATT”**

Oleh :

**REZA HAMULIAN
1710017211050**

*Telah diuji dan dipertahankan pada Sidang Tugas Sarjana
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Bung
Hatta pada Tanggal 11 Agustus 2021 dengan Dosen-dosen Penguji :*

Disetujui Oleh :

Ketua Sidang

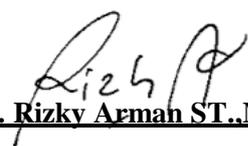


Dr. Burmawi, S.T., M.Si.

NIK : 196912272005011000

Diketahui Oleh :

Penguji I



Ir. Rizky Arman ST., MT
NIDN : 1026057402

Penguji II



Iqbal, S.T., M.T.
NIDN: 1014076601

**PERNYATAAN KEASLIAN ISI
LAPORAN SKRIPSI (TUGAS SARJANA)**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Reza Hamulian

NIM : 1710017211050

Program Studi : Strata-1 Teknik Mesin

Judul Tugas Akhir : Perancangan Bilah Horizontal Axis Wind Turbine Tipe Taperless Dengan Airfoil
Naca 4412 Dengan Daya 500 Watt

Menyatakan bahwa skripsi dengan judul di atas adalah benar hasil karya sendiri kecuali yang bereferensi dan dinyatakan sumbernya pada referensi yang tertera dalam daftar pustaka.

Padang, 20 Agustus 2021

Saya yang menyatakan,

Reza Hamulian

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Sujud Syukur Pada Sang Maha, Allah SWT

Terima Kasihku Pada Pembawa Cahaya Penuntun, Nabi Muhammad SAW

Kecup Indah Untuk Pembimbing Kehidupan Manusia, Alqur'an

Maha Suci Engkau, Tidak Ada Pengetahuan Kami

Kecuali Yang Engkau Ajarkan Kepada Kami

Sesungguhnya Engkaulah

Yang Maha Mengetahui Lagi Maha Bijaksana

(Al Baqarah: 32)

Sesungguhnya Sesudah Kesulitan Itu Ada Kemudahan

Maka Apabila Kamu Telah Selesai Dalam Suatu Urusan

Kerjakanlah Dengan Sungguh – Sungguh Urusan Yang Lain

Dan Hanya Kepada Allah- Lah Kamu Berharap

(QS : Al – Insyirah : 6 – 7)

...Ya Tuhanku Tunjukilah Aku Untuk Mensyukuri Nikmat Engkau

Yang Telah Engkau Berikan kepadaku Dan Kepada Ibu dan Bapakku

Dan Supaya Aku Dapat Berbuat Amal Yang Shaleh Yang Engkau Ridhoi...

(QS : Al – Ahqaaf : 15)

Yaa Allah... Yaa Rohmaan... Yaa Rohim... Alhamdulillah

Hari Ini Aku Merasa Lega Dan Dapat Tersenyum Serta

Bersyukur Padamu ya Allah

Atas Hari Yang Telah Engkau Janjikan Jadi Milikku

Karena-Mu Yaa Allah Aku Mampu Meraih Gelar Kesarjanaan

Segelintir Harapan Dan Keberhasilan Telah Ku Gapai

Namun Seribu Tantangan Masih Harus Ku Hadapi

Hari Ini Merupakan Langkah Awal Bagiku

Meraih Cita – Cita, Maka Dari Itu Aku Mohon Pada-Mu Yaa Allah

Tunjukilah Aku Dan Bimbinglah Aku Dalam Rahmat-Mu...

Ibu Dan Ayah...
Kasihmu Begitu Tulus Dan Suci
Demi Harapan Dan Cita-cita Anakmu
Pengorbananmu Adalah Langkah Masa Depanku Rintangan
Dan Tantanganmu Adalah Pelita Hidupku Dengan Segala Kerendahan Dan
Ketulusan Hati Kupersembahkan Buah Goresan Pikiran Ini
Keharibaan Bapak (Hafnizal) Dan ibu (Warni)
Tercinta Yang Merupakan Semangat
Hidup Bagi Ku.

Terima Kasih atas segala dorongan, serta Do'a Selama Ini Dan Doa Yang Tak Putus-putusnya Dari adikku (Fitrah amami) Ayo jangan mau kalah sama kakak kejar cita – cita mu dan kekasihku tercinta yang selalu menjadi Support System dan selalu ada saat dibutuhkan Lia Agustina Harahap.

Terima Kasih atas ilmu yang telah bapak/ibu berikan kepadaku, bimbingan dan juga dorongan sehingga aku bisa menyelesaikan pendidikan Stara satu (S1) ini, untuk bapak pak Dr. Burmawi, S.T., M.Si, ibu Dr. Ir. Wenny Martiana, M.T, bapak Ir Mulyanef, M.Sc., pak Dr. Yovial Mahjoedin, M.T, Iqbal, S.T., M.T, pak Ir Kaidir, M.Eng. Pak Suryadimal, S.T, M.T, pak Ir Duskiardi, M.T pak Riski Arman, S.T., M.T pak Dr. Ir Edi septe S., M.T. dan aku ucapkan beribu-ribu terimakasih.

Untuk Sahabat-Sahabtku Tercinta
Teknik Mesin Angkatan 2017 yang senasib dan seperjuangan
buat senior dan junior Teknik Mesin
Persahabatan Yang Indah Ini Tidak Akan Pernah Putus.
Sahabat Adalah Orang Yang Mengulurkan Tangan Disaat Kita
Susah Mengangkat Kita Saat Kita Terjatuh Dan
Membawa Kebahagiaan
Disaat Senang

Untuk Angkatan 2017 Teknik Mesin
Yang masih berjuang tanpa di sebut nama nya satu per satu tetap semangat dan jangan Pernah putus asa untuk meraih cita-cita
Semoga kita semua menjadi orang Sukses
Buat Sahabat Se Perjuangan Skripsi yaitu Agil Pebri Saputra, S.T, Deji Putra, M. Fadly Firmansyah, S.T. Hanafy Heryu, S.T, Rifky Safri Yanda, S.T, Al-ghaffar Erza Septian, S.T, M. Fikri Judilla, S.T, Fauzan Akmal Hasibuan, S.T, Tri Setiyono, S.T. Khori, S.T.
Terimalah Semua Ini Sebagai Bakti Dan Bukti Cintaku

*Atas Segala Doa Dan Kasih Sayang Yang Telah Diberikan KepadaKu
Semoga Rahmat Allah Yang Ku Terima
Menjadi Cahaya Dalam Kehidupanku Dan Kehidupan Kita Semua
Amin Ya Robbal Alamin....*

Wassalam,

Reza Hamulian

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah Subhanahu wa ta'ala. yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, serta berkat petunjuk-Nya penulis dapat menyelesaikan Penulisan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini merupakan syarat untuk memperoleh gelar Sarjana (S1). Adapun Judul dari Tugas Akhir ini adalah “ Perancangan Bilah *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) Tipe *Taperless* dengan *Airfoil* NACA 4412 untuk Daya 500 Watt. “

Sehubungan dengan telah selesainya Tugas Akhir ini, yang mana tak terlepas dari bantuan beberapa pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua (Ibu dan Bapak), kakak dan adik penulis yang senantiasa mendoakan dan menjadi motivasi tersendiri bagi penulis.
2. Bapak Dr. Yovial Mahjoedin M.T selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Bung Hatta
3. Bapak Dr. Burmawi, S.T.,M.Si. Selaku dosen pembimbing Tugas Akhir. Yang telah memeberikan banyak ilmu sehingga penulis mampu menyelesaikan Proposal Tugas Akhir ini.
4. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam pembuatan Tugas Akhir ini.
Semoga bantuan yang telah diberikan baik moril maupun materil dibalas oleh Allah Subhanahu wa ta'ala dengan pahala yang berlipat ganda.

Demikian Tugas Akhir ini penulis buat semoga bermanfaat dan dapat digunakan sebagaimana mestinya. Penulis berharap agar kiranya Tugas Akhir ini dapat diterima.

Padang, 27 Januari 2021

Reza Hamulian

ABSTRAK.

Energi angin ini dapat di jadikan penggerak untuk memutar bilah turbin angin,dimana energi mekanik yang dihasilkan oleh bilah turbin angin digunakan untuk memutar generator agar menghasilkan enegi listrik. Berdasarkan hal tersebut maka perlu dirancang suatu bilah turbin angin yang dapat beroperasi pada kecepatan angin yang rendah kecepatan angin maksimum 10 m/s menggunakan jenis turbin *horizontal axis wind turbine* (HAWT), jenis bilah *taperless* dengan daya dihasilkan sebesar 500 watt.

Metodologi perancangan bilah adalah dengan melakukan studi literatur, pengolahan data geometri bilah, simulasi dan analisa. Perancangan bilah diperoleh panjang bilah 1 meter, lebar bilah 12 cm dan tebal 25,05 mm menggunakan *airfoil* NACA 4412 dengan *twist* dilinierisasikan. *Coefficient performance* bilah sebesar 50%, untuk menghasilkan daya 500 watt dibutuhkan kecepatan angin 10 m/s dengan kecepatan putar bilah 1076 rpm dan torsi sebesar 4,4 Nm.

Keys : Energi,bilah,airfoil,turbin angin, Q blade

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
PERNYATAAN KEAHLIAN SKRIPSI.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK.....	v
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Energi Angin.....	4
2.2 Potensi Energi Angin di Indonesia.....	4
2.3 Turbin Angin.....	5
2.4 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga bayu (PLTB).....	7
2.5 Bilah Turbin Angin... ..	8
2.5.1 Tipe Bilah Turbin Angin	8
2.5.2 Gaya Yang Bekerja Pada Bilah.....	9
2.5.3 Banyak bilah	10
2.5.4 Parameter Dalam Perancangan Bilah Turbin	10
2.6 <i>Airfoil</i>	11
2.6.1 NACA Airfoil	13
2.7 <i>Material Bilah Turbin Angin</i>	
2.8 Perhitungan Perancangan Bilah <i>Taperless</i>	13
2.8.1 Menentukan Kapasitas Daya Dan Efisiensi Sistem	14

2.8.2	Menentukan Jari – Jari Bilah.....	15
2.8.3	Menentukan Tip Speed Ratio (TSR) dan <i>Airfoil</i>	16
2.8.4	Membagi Elemen Bilah	16
2.8.5	Menghitung Jari – Jari Parsial	16
2.8.6	Menghitung TSR Parsial.....	16
2.8.7	Menghitung Sudut Serang atau <i>Flow Angle</i>	17
2.8.8	Menghitung Sudut Puntir atau <i>Twist Angle</i>	17
2.8.9	Menghitung Lebar Bilah atau <i>Chord</i>	18
2.8.10	Koreksi Lebar Bilah	18

BAB III METODOLOGI

3.1	Alat	20
3.1.1	Perangkat keras (<i>Hardware</i>)	20
3.1.2	Perangkat lunak (<i>Software</i>).....	20
3.2	Diagram Alir.....	22
3.3	Metodologi Pembuatan	23
3.3.1	Rumusan Masalah	23
3.3.2	Studi Literatur	23
3.3.3	Pengumpulan Data	23
3.3.4	Pembuatan Laporan.....	23
3.3.5	Pembuatan Rancangan.....	23
3.4	Waktu dan Tempat	24

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Perhitungan Geometri Bilah.....	25
4.1.1	Tabel Spesifikasi Menentukan Panjang Jari-jari Bilah.....	25
4.1.2	Perhitungan Geometri Bilah untuk Menentukan Panjang Jari-jari Bilah	25
4.1.3	Perhitungan Geometri Bilah untuk Mendapatkan Nilai Lebar Bilah dan Analisis Karakteristik Airfoil untuk Menentukan Airfoil yang Digunakan.....	29

4.1.4	Perhitungan Geometri Bilah untuk Mendapatkan Nilai Sudut Puntir Bilah	32
4.2	Simulasi dan Analisa Perhitungan Geometri Bilah	42
4.3	Mendapatkan Nilai Tebal Bilah dan Bentuk 3 dimensi Bilah.....	45
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan	50
5.2	Saran	50

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta Potensi Angin di Indonesia.....	5
Gambar 2.2 Sketsa Sederhana Turbin Angin.....	6
Gambar 2.3 Kurva Performa Jenis – Jenis Turbin Angin	7
Gambar 2.4 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.....	7
Gambar 2.5 Tipe Bilah Turbin Angin.....	8
Gambar 2.6 Ilustrasi Gaya Yang Bekerja Pada Bilah.....	9
Gambar 2.7 Hubungan <i>Coefficient Lift</i> Dengan <i>Angle Of Attack</i>	12
Gambar 2.8 Bagian – Bagian Pada <i>Airfoil</i>	13
Gambar 3.1 Diagram Alir Perancangan.....	22
Gambar 4.1 Grafik CL/CD terhadap alpha airfoil NACA 4412	30
Gambar 4.2 Grafik CL/CD terhadap alpha airfoil NACA 4415	30
Gambar 4.3 Grafik CL/CD terhadap alpha airfoil NACA 4418	31
Gambar 4.4 Grafik perbandingan CL/CD terhadap alpha masing-masing jenis airfoil	31
Gambar 4.5 Grafik Cl terhadap alpha pada elemen ke-1.....	38
Gambar 4.6 Grafik Linearisasi twist 75%	40
Gambar 4.7 Simulasi perhitungan geometribilah pada software Qblade v0.963.....	42
Gambar 4.8 Grafik Cp/Tsr	42
Gambar 4.9 Grafik kecepatan angina terhadap daya yang di hasilkan (P-V).....	43
Gambar 4.10 Grafik daya yang dihasilkan terhadap kecepatan putar bilah (P-Rpm) 43	
Gambar 4.11 Grafik torsi terhadap kecepatan putar bilah (Q-Rpm).....	44
Gambar 4.12 Hasil input koordinat airfoil tiap elemen ke software solidworks 201645	
Gambar 4.13 Airfoil sesudah dimasukkan sudut puntir dan skala	45
Gambar 4.14 Pembuatan pangkal bilah.....	46
Gambar 4.15 Extrude pada airfoil sesudah di masukkan sudut puntir dan skala.....	46
Gambar 4.16 Bilah tipe taperless 3 dimensi tampak isometric	46
Gambar 4.17 Bilah tipe taperless 3 dimensi tampak atas	47
Gambar 4.18 Bilah tipe taperless 3 dimensi tampak bawah	47
Gambar 4.19 Bilah tipe taperless 3 dimensi tampak kanan	47
Gambar 4.20 Bilah tipe taperless 3 dimensi tampak depan.....	47
Gambar 4.21 Bilah tipe taperless 3 dimensi tampak belakang	47
Gambar 4.22 Pengukuran pada pangkal bilah untuk menentukan tebal bilah.....	48

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat mekanis kayu mahoni (<i>swietenia macrophylla</i>)	24
Tabel 3.4 Jadwal Tugas Akhir Bulan November-Desember	24
Tabel 4.1.1 Spesifikasi jari-jari bilah	25
Tabel 4.1.3 Parameter geometri bilah.....	29
Tabel 4.1.4 Hasil perhitungan geometri bilah untuk mendapatkan nilai sudut puntir bilah.....	41

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini sebagian besar energy listrik yang digunakan di Indonesia berasal dari energy fosil, yaitu bahan bakar minyak (BBM), gas dan batu bara. Energi fosil merupakan jenis energy tidak terbarukan (*non-renewable*) yang ketersediaanya mulai terbatas. Pemanfaatan energi baru terbarukan (*renewable*) bisa menjadi salah satu solusi pemecah keterbatasan energy fosil.

Energi angin merupakan salah satu energi baru terbarukan, ketersediaanya yang tak terbatas merupakan salah satu alasan kuat untuk memanfaatkan energy angin di Indonesia. Data oleh Badan Penelitian dan Pengembangan KESDM, Indonesia memiliki potensi energi angin yang tersebar hampir di seluruh wilayah Indonesia. Namun kecepatan angin di Indonesia terdapat fluktuasi sehingga profil kecepatan angin di Indonesia dapat berubah-ubah secara drastis dalam waktu interval yang cepat (Sumber: Badan Penelitian dan Pengembangan KESDM,2017).

Energi angin ini dapat di jadikan penggerak untuk memutar bilah turbin angin, dimana energi mekanik yang dihasilkan oleh bilah turbin angin digunakan untuk memutar generator agar menghasilkan enegi listrik. Berdasarkan hal tersebut maka perlu dirancang suatu bilah turbin angin yang dapat beroperasi pada kecepatan angin yang rendah dan fluktuatif. Jenis bilah yang banyak digunakan saat ini adalah bilah *Horizontal Axis wind turbine* (HAWT) yang memiliki efisiensi dari pada bilah *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Selain itu, pada umumnya pembangkit listrik tenaga bayu di Indonesia menggunakan jenis bilah HAWT. Jenis bilah turbine angin yang digunakan tipe *teperless* karna bilah jenis ini memiliki keunggulan seperti *thrust* dan *drag* yang dihasilkan lebih kecil dan sesuai dengan dengan kecepatan angin di indinesia yang relating sedang hingga pelan (LAN,2012).

Untuk mengetahui karakteristik aerodimanik dan efisiensi, maka geometric bilah di buat dengan menggunakan *airfoil NACA* (*The United States National Advisory committee For Aeronautics*). Pemilihan jenis *airfoil* bilah yang tepat diharapkan dapat meningkatkan efisiensi bilah yang akan diaplikasikan pada turbin angin. Oleh karena itu dalam Tugas Akhir ini juga membahas perbandingan NACA *airfoil* yang digunakan agar bisa menghasilkan efisiensi yang tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan maka dapat dirumuskan beberapa masalah yaitu:

1. Bagaimana cara merancang bilah *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) tipe *taperless* menggunakan *airfoil* NACA 4412 yang dapat di gunakan pada turbin angin dengan kapasitas daya 500 watt pada kecepatan 10 m/s ?
2. Bagaimana geometri bilah tipe *taperless* yang dapat digunakan pada turbin angin dengan kapasitas daya 500 watt pada kecepatan angin 10 m/s ?
3. Bagaimana karakteristik dan efisiensi bilah tipe *taperless* dengan *airfoil* NACA 4412 dengan mensimulasikanya menggunakan *software* Qblade ?

1.3 Tujuan

Tujuan dari perancangan bilah turbin angin pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Merancang bilah *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) tipe *Taperless* dengan *airfoil* NACA 4412 yang dapat digunakan pada turbin angin dengan kapasitas daya 500 watt pada kecepatan 10 m/s.
2. Mengetahui karakteristik dan efisiensi bilah tipe *taperless* dengan *airfoil* NACA 4412 dengan mensimulasikannya menggunakan *software* Qblade.
3. Mengetahui geometri bilah tipe *taperless* yang dapat digunakan pada turbin angin dengan kapasitas daya 500 Watt pada kecepatan angin 10 m/s

1.4 Batasan Masalah

Agar proses penulisan laporan ini tidak terlalu luas topik pembahasanya, maka di perlukan adanya pembatasan masalah, antara lain sebagai berikut.

1. Turbin angin yang digunakan adalah turbin angin *The Sky Dancer* kapasitas daya 500 watt dengan jumlah bilah 3 buah.
2. Jenis bilah yang dirancang adalah bilah *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) tipe *taperless*
3. *Airfoil* yang digunakan yaitu NACA 4412.
4. Bahan dasar pembuatan bilah dilakukan dengan jenis kayu mahoni (*Swietenia Macrophylla*)
5. Untuk mengetahui efisiensi dan performa bilah maka dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* Qblade.

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan tugas akhir ini sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini berisi penjelasan mengenai sub bab latar belakang, alasan pemilihan judul, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini berisi mengenai penjelasan mengenai sub bab mengenai energi angin, bilah turbin angin serta parameter-parameter perancangan bilah dan materi terkait judul tugas akhir.

BAB III METODE PERANCANGAN

Dalam bab ini berisi penjelasan mengenai waktu dan tempat perancangan tugas akhir,serta diagram alir.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini berisi tentang hasil perancangan, simulasi dan analisa gambar bilah yang di rancang.

BAB V PENUTUP

Dalam bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dalam tugas akhir ini.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

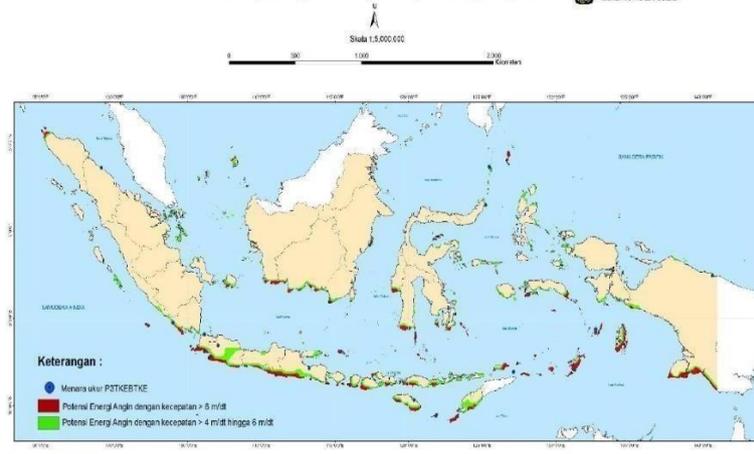
2.1 Energi Angin

Angin adalah udara yang bergerak dari daerah yang bertekanan tinggi ke daerah yang bertekanan rendah, atau dari daerah yang bersuhu rendah ke daerah yang bersuhu tinggi. Udara yang panas di suatu tempat di permukaan bumi akan mengalami pengembangan atau pemuaian sehingga tekanan udara menjadi lebih rendah dibandingkan sekitarnya. Udara yang lebih dingin dan bertekanan lebih tinggi di tempat lain akan bergerak menuju daerah ini untuk mengisi kekosongan yang ada (Pusat Ilmu Geografi Indonesia, t.thn.).

Angin, yang disebabkan oleh gerakan molekul udara di atmosfer, berasal dari energi matahari. Sekitar 2% dari sinar matahari yang mengalir ke bumidiubah menjadi tenaga angin, yang mana hasil akhirnya berubah menjadi panas dikarenakan gesekan dengan lapisan batas atmosfer. Radiasi matahari memanaskan di berbagai tempat di bumi dengan kecepatan yang berbeda pada siang dan malam hari, hal ini menyebabkan berbagai bagian atmosfer memanaskan dalam waktu yang berbeda. Udara panas menaik dan udara yang lebih sejuk tertarik untuk menggantikannya, sehingga menyebabkan terjadinya angin.

2.2 Potensi Energi Angin di Indonesia

Indonesia adalah suatu negara yang dikaruniai potensi alam yang begitu besar, salah satunya potensi energi angin yang tersebar hampir di seluruh wilayah Indonesia. Gambar 3.1 menunjukkan peta potensi energi angin di Indonesia. Daerah yang diberi warna hijau merupakan daerah dengan kecepatan rata-rata angin >4 m/s, yaitu daerah pada pesisir Selatan Jawa, Sulawesi, dan pulau-pulau bagian timur Indonesia, sedangkan yang diberi warna merah merupakan daerah dengan kecepatan angin di atas 6 m/s. Namun kecepatan angin di Indonesia terdapat fluktuasi, sehingga kecepatan angin dapat berubah-ubah secara drastis dalam interval waktu yang cepat (Anggi Dewita, 2015).



Gambar 2.1 Peta potensi angin di Indonesia

(Sumber: Badan Penelitian dan Pengembangan KESDM, 2017)

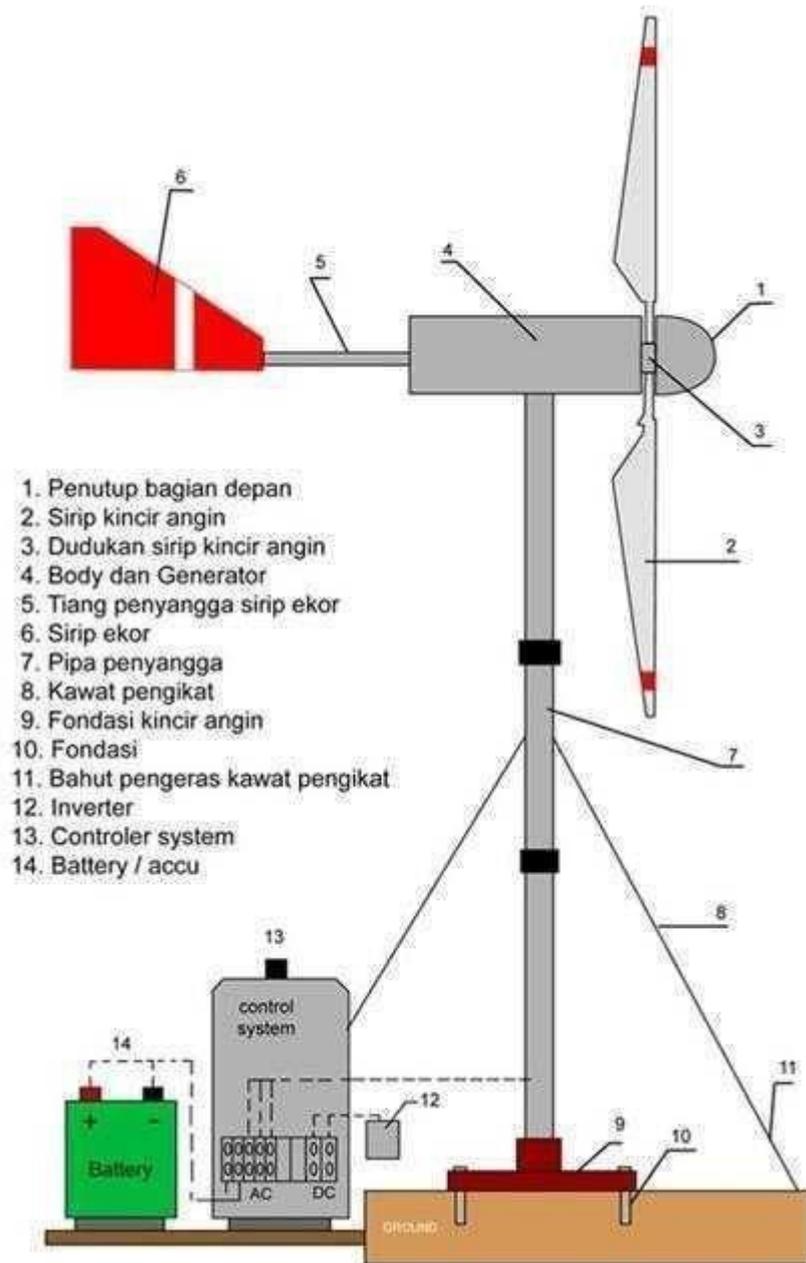
Tim Lentera Angin Nusantara (LAN) mengadakan pengujian potensi energi angin dan juga turbin angin di Pantai Cipatujah, Tasikmalaya-Jawa Barat sejak Januari 2012. Berdasarkan hasil pengujian didapatkan bahwa kecepatan angin di atas 3 m/s pada ketinggian 5 meter berhembus selama 2510 jam atau sekitar 104 hari dengan rata-rata energi per harinya sebesar 490 Wh (LAN, 2012).

Berdasarkan kriteria turbin angin seperti TSD-500 dibutuhkan angin berkecepatan minimal 3 m/s untuk mulai berproduksi (LAN, 2012). Daerah yang memiliki kecepatan rata-rata angin di atas 3 m/s banyak ditemui pada pesisir Selatan Jawa, Sumatera, dan pulau bagian timur Indonesia. Dalam menentukan energi angin di suatu daerah bukan hanya dengan mengetahui kecepatan angin rata-rata pada daerah tersebut karena kecepatan angin sangat fluktuatif setiap waktunya, melainkan perhitungan lama/durasi kecepatan angin tersebut berhembus setiap harinya sehingga dapat diketahui besar energinya (LAN, 2014).

2.3. Turbin Angin

Turbin adalah alat konversi energi yang digunakan untuk merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Cara kerjanya cukup sederhana, energi angin yang memutar turbin angin, diteruskan untuk memutar rotor pada generator di belakang bagian turbin angin, sehingga akan menghasilkan energi listrik.

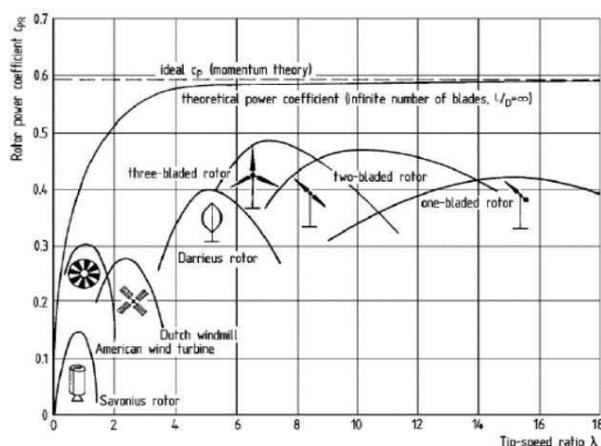
Energi listrik ini biasanya akan disimpan kedalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan. Secara sederhana sketsa turbin angin adalah sebagai berikut:



Gambar 2.2 Sketsa Sederhaana Turbin Angin Sumber:

(Sumber: LAN, 2014)

Untuk jenis turbin angin yang banyak di gunakan saat ini adalah jenis *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dengan jumlah bilah sebanyak 2 atau 3 buah. Turbin angin jenis HAWT memiliki C_p yang lebih baik dibandingkan jenis VAWT, yaitu sebesar 45%-50%, sedangkan jenis VAWT umumnya berada di bawah 40% (Sandra Eriksson, 2008). Semakin tinggi efisiensi suatu turbin, Semakin maksimal pula turbin tersebut mengkonversi energi yang didapatnya.

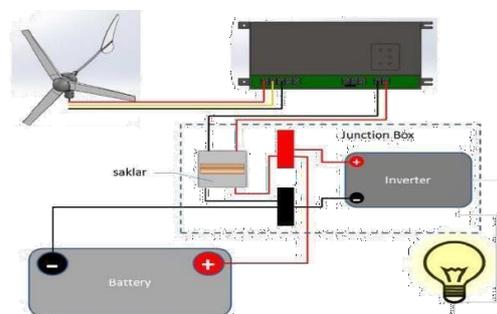


Gambar 2.3. Kurva performa jenis-jenis turbin angin

(Sumber: Hau, 2013)

2.4. Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Hasil putaran bilah selanjutnya di teruskan untuk memutar generator yang kemudian menghasilkan tegangan AC tiga fasa. Setelah itu ketiga fase tegangan AC dialirkan ke controller. Pada controller tegangan AC yang di dihasilkan dari generator di stabilkan dan di konversikan menjadi tegangan DC karena media untuk penyimpanan energi harus dalam bentuk tegangan DC. Setelah melalui tahap konversi tegangan AC menjadi DC, kemudian memasuki tahap perekaman data melalui data logger, pada data logger dapat di ambil data seperti, data tegangan, arus, kecepatan angin, dan arah angin untuk disimpan dan dilakukan penelitian lebih lanjut. Setelah melalui data logger energi listrik akan disimpan pada baterai. Sebelum digunakan pada beban (peralatan listrik AC) energi listrik yang disimpan pada baterai harus dikonversi terlebih dahulu melalui inverter tegangan dari DC di konversi menjadi tegangan AC.



Gambar 2.4. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

(Sumber: LAN, 2014)

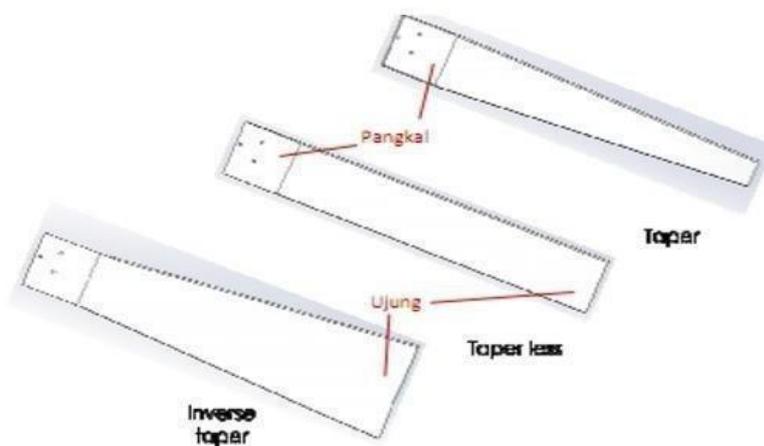
2.5. Bilah Turbin Angin

Bilah merupakan bagian penting dalam suatu sistem pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB), yaitu komponen yang berinteraksi langsung dengan angin. Bilah berfungsi untuk mengubah gerak angin menjadi gerak mekanik. Bilah turbin angin ini sendiri dapat dibuat dengan berbagai bahan, tergantung darisegi perancangannya. Pada laporan tugas akhir ini penulis merancang bilah dengan bahan dasar yaitu kayu mahoni.

2.5.1. Tipe Bilah Turbin Angin

Berdasarkan desainnya, bilah turbin angin dibedakan menjadi 3 tipe yaitu :

1. *Taper*, ujungnya lebih kecil daripada pangkalnya. *Blade* jenis ini cocok untuk angin berkecepatan tinggi.
2. *Taperless*, ujung dan pangkal memiliki lebar yang sama. *Blade* jenis ini cocok untuk angin yang berkecepatan sedang.
3. *Inverse Taper*, ujungnya lebih besar daripada pangkalnya. *Blade* jenis ini cocok untuk daerah dengan angin berkecepatan rendah. Dengan putaran yang rendah, maka torsi yang dihasilkan akan tinggi.



Gambar 2.5. Tipe bilah turbin angin

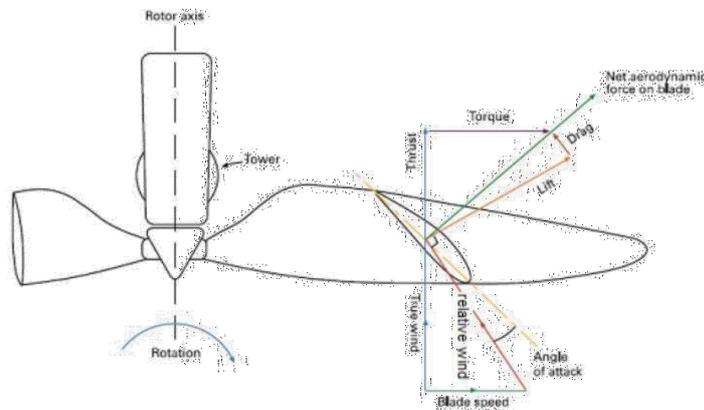
(Sumber: LAN, 2014)

Jenis bilah yang banyak digunakan di Indonesia saat ini adalah bilah tipe *taperless*. Bilah *taper* memiliki kemampuan kecepatan putar yang lebih tinggi sehingga *shaft* generator akan berputar dengan lebih cepat dan tidak diperlukan *gearbox* besar (Burton, 2011). Gaya pada elemen bilah dipengaruhi oleh *chord* bilah, maka bilah *taperless* memiliki keunggulan karena lebar *chord*-nya yang sama ke ujung sehingga *thrust* dan *drag* yang dihasilkan lebih rendah. Selain itu material serta biaya produksi

yang dibutuhkan juga relatif lebih rendah. Meskipun bilah *taperless* memiliki keunggulan seperti *thrust* dan *drag* yang dihasilkan lebih kecil namun, bilah ini menghasilkan torsi yang lumayan kecil terutama pada kecepatan rendah, akan berdampak pada nilai *start-up speed* yang lebih tinggi atau sulit untuk mulai berputar (Saoke, 2015)

2.5.2. Gaya Yang Bekerja Pada Bilah

Kecepatan angin relatif yang bekerja pada *airfoil* bilah dipengaruhi oleh kecepatan aksial yang dihasilkan bilah dan kecepatan putar bilah tersebut. Kecepatan angin relatif yang bekerja pada bilah akan menyebabkan *airfoil* mengalami beberapa gaya, yaitu sebagai berikut:



Gambar 2.6. Ilustrasi gaya yang bekerja pada bilah

(Sumber: Padmaja, 2013)

1. Gaya angkat (*lift*) L bekerja tegak lurus dengan arah aliran udara yang disebabkan oleh Efek *Bernoulli* yang menurunkan tekanan di atas menyebabkan kecepatan aliran lebih tinggi pada bagian bawah dan karenanya bagian bawah mengalami tekanan yang lebih rendah. Gaya angkat dipengaruhi oleh *coefficient lift airfoil*.
2. Gaya hambat (*drag*) D bekerja sejajar dengan arah aliran udara yang disebabkan oleh Efek *Bernoulli* yang menurunkan tekanan di bawah menyebabkan kecepatan aliran lebih tinggi pada bagian atas dan karenanya bagian atas mengalami tekanan yang lebih rendah. Gaya hambat dipengaruhi oleh *coefficient drag airfoil*.

3. Gaya dorong (*thrust*) T adalah resultan dari gaya angkat dan gaya hambat merupakan gaya dorong T yang efektif memutar sudu rotor. Rasio resultan dari *lift* untuk drag L/D adalah fungsi dari *angle of attack* α untuk bagian *airfoil* tertentu.
4. Torsi (*torque*) Q atau momen gaya adalah besaran yang menyatakan besarnya gaya yang bekerja memutar bilah.

2.5.3. Banyak Bilah

Banyak bilah yang perlu digunakan pada suatu turbin ditentukan oleh tujuan dirancangnya turbin tersebut dan kecepatan angin yang diperlukannya untuk beroperasi (Strong, 2008). Semakin banyak jumlah bilah yang digunakan pada turbin angin akan berdampak pada area putaran bilah akan menjadi lebih sedikit dan akan terbentuk dinding *solid* yang dapat menghalau laju angin dan bilah akan berputar lebih lambat.

Penelitian oleh Hau (2013) menunjukkan bahwa kenaikan efisiensi dari desain 1 bilah ke 2 bilah adalah sekitar 10%, desain 2 bilah ke 3 bilah adalah sebesar 3-4%, dan desain 3 bilah ke 4 bilah adalah sebesar 1-2%. Pertimbangan biaya produksi yang besar untuk membuat 1 bilah tambahan untuk efisiensi yang hanya sedikit lebih baik menyebabkan desain 3 bilah menjadi lebih banyak digunakan dibandingkan desain 4 bilah atau desain dengan bilah yang lebih banyak lainnya. Desain dengan 1 atau 2 bilah bekerja dengan kondisi TSR yang lebih tinggi dibandingkan desain 3 bilah, dan menghasilkan gangguan suara yang lebih bising. Desain 1 dan 2 bilah juga memiliki kondisi kerja aerodinamis yang tidak asimetris sehingga desain 3 bilah lebih banyak digunakan karena putarannya yang lebih stabil.

2.5.4. Parameter Dalam Perancangan Bilah Turbin Angin

Dalam merancang bilah turbin angin ada beberapa parameter yaitu :

1. Panjang bilah untuk menentukan seberapa banyak energi angin yang dapat diperoleh berdasarkan luas area sapuan bilah.
2. *Twist* atau sudut puntir adalah sudut antara *chord line* dengan bidang rotasi rotor. *Twist* optimum bilah bergantung pada nilai *tip speed ratio* dan nilai *angle of attack airfoil* yang diinginkan. Pemberian *twist* berguna untuk meningkatkan efisiensi bilah (Piggott, 1997), dan

linearisasi sudut *twist* umum dilakukan untuk memudahkan proses manufaktur (Schubel & Crossley, 2012).

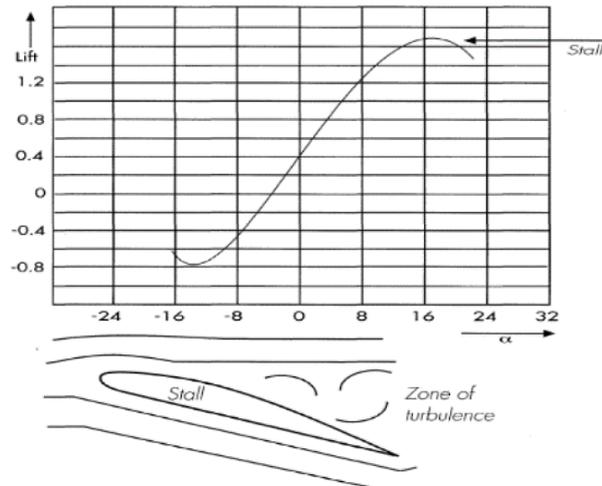
3. *Coefficient performance*, adalah kemampuan bilah untuk menyerap energi angin yang diterimanya. Semakin besar nilai C_p maka semakin besar juga kemampuan suatu turbin untuk mengonversikan energi angin yang diperolehnya menjadi energi mekanik.

Berdasarkan teori Betz nilai maksimum *coefficient performance* sebesar 59,3%

4. *Tip Speed Ratio* (TSR) adalah perbandingan antara kecepatan linier putaran ujung bilah dengan kecepatan angin.
5. *Angle of attack* adalah sudut antara *chord line* dengan arah gerak aliran angin relatif.
6. *Airfoil* bilah adalah bentuk desain ujung *blade* berdasarkan gayaangkat dan dorong (*lift* dan *drag forces*) *blade* terhadap aliran udara yang melewatinya.

2.6. Airfoil

Airfoil adalah bentuk desain aerodinamis penampang bilah. Perencanaan geometri bilah agar dapat berputar dengan baik didasari pada rasio C_l/C_d (*lift coefficient/drag coefficient*) yang tinggi (Hasanin, 2017). Nilai C_l akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *angle of attack* hingga mencapai suatu titik *stall* dan nilai C_l akan menurun (Piggott, 1997). *Stall* merupakan suatu kondisi ketika *airfoil* bekerja pada nilai *angle of attack* yang sangat tinggi sehingga *boundary layer* akan terpisah dari permukaan atas *airfoil* (Anderson, 2017). Selain itu bilangan Reynolds juga mempengaruhi nilai C_l dan C_d suatu *airfoil*.

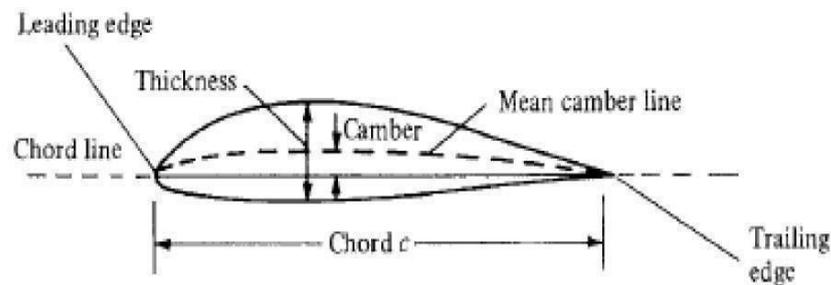


Gambar: 2.7. Hubungan *coefficient lift* dengan *angle of attack*
(Sumber: Piggott, 1997)

Permukaan bagian atas *airfoil* atau bagian yang terkena angin terlebih dahulu memiliki kecepatan aliran angin yang lebih tinggi dibandingkan bagian bawah permukaan *airfoil*. Berdasarkan prinsip Bernaulli, bagian atas *airfoil* akan memiliki tekanan udara yang lebih rendah dibandingkan permukaan bagian bawah *airfoil*. Oleh karena udara bergerak dari tempat bertekanan tinggi ke bertekanan rendah, maka angin akan mengangkat *airfoil* dan terciptalah gaya angkat/ *lift force*. Pada sebuah *airfoil* terdapat bagian-bagian yang terdiri dari :

1. *Camber line* yaitu garis tengah antara permukaan atas dan bawah dari *airfoil*.
2. *Leading edge* yaitu titik paling depan *airfoil* yang mengenai angin.
3. *Trailing edge* yaitu titik paling belakang *airfoil* yang mengenai angin.
4. *Chord line* yaitu garis penghubung antara *leading edge* dan *trailing edge*.
5. *Chord* yaitu jarak antara *leading edge* dan *trailing edge* yang tegak lurus terhadap *chord line*.
6. *Camber* yaitu jarak antara *mean camber line* yang tegak lurus terhadap *chord line*.

7. *Thickness* yaitu jarak antara permukaan atas dan bawah yang tegak lurus terhadap *chord line*.



Gambar 2.8. Bagian-bagian pada *airfoil*

(Sumber: Anderson, 2017)

2.6.1. NACA Airfoil

NACA (*National Advisory Committee of Aerounatics*) merupakan salah satu lembaga standar dalam perancangan suatu *airfoil*. Meskipun dulunya *airfoil* NACA dikembangkan untuk keperluan teknologi penerbangan, sekarang *airfoil* NACA juga banyak digunakan untuk keperluan turbin angin (Hasan, 2017). Penelitian oleh Timmer dan Rooij (2003) menyatakan bahwa salah satu profil *airfoil* yang banyak digunakan sebagai bentuk dasar bilah turbin angin adalah *airfoil* yang dikembangkan oleh NACA dengan kode NACA 4 digit (seri NACA 44xx) dan NACA 5 digit (seri NACA 63xxx). NACA mengklasifikasikan bentuk *airfoil* dengan menggunakan sistem angka digit yang memiliki artinya masing-masing, seperti halnya untuk kode 4 digit dan 5 digit.

Pada *airfoil* dengan kode 4 digit, angka pertama menunjukkan maksimum *camber* dalam seperseratus *chord*, angka kedua menunjukkan posisi maksimum *camber* pada *chord line* dalam sepersepuluh *chord* dari *leading edge*, dan dua angka terakhir menunjukkan lebar maksimum *airfoil* dalam seperseratus *chord*. Sedangkan pada *airfoil* dengan kode 5 digit, angka pertama menunjukkan nilai koefisien gaya angkat ketika dikalikan dengan 0.15, angka kedua dan ketiga jika dibagi 2 menunjukkan letak maksimum *camber* di *chord line* dalam seperseratus *chord* diukur dari *leading edge*, dan dua angka terakhir menunjukkan lebar maksimum *airfoil* dalam seperseratus *chord* (Abbott, 1945)

2.7. Material Bilah Turbin Angin

Terdapat beberapa pilihan material yang dapat digunakan sebagai material bilah turbin angin seperti logam, komposit, *styrofoam*, dan kayu (Piggott, H. 1997) . Material logamaluminium cenderung mudah terjadi bengkok, sedangkan material logam besi

menyebabkan bilah sulit berputar karena massa jenis materialnya berat. Material komposit seperti *resin polyster* merupakan jenis material yang banyak di gunakan,tapi diperlukan cetakan sehingga untuk membuatnya memerlukan biaya tambahan.

Material *styrofoam* memiliki sifat yang ringan, mudah dibentuk namun mudah patah. Material kayu memiliki sifat ringan, kuat dan mudah dibentuk sehingga dapat dijadikan material bilah. Kayu untuk material bilah sebaiknya kayu yang ringan kuat dan memiliki serat yang rapat serta bebas dari mata kayu. Jenis kayu yang biasa di jadikan material bilah adalah kayu pinus, basswood, dan meranti (Hugh Piggott,1997). Dikarenakan jenis kayu tersebut langka maka pada penelitian ini menggunakan material kayu mahoni (*swietenia macrophylla*).

2.8. Kayu Mahoni (*Swietenia Macrophylla*)

Mahoni merupakan pohon berukuran besar yang dapat mencapai ketinggian sekitar 35 meter dengan diameter batang dapat mencapai 125 cm. Batang pohon mahoni umumnya lurus berbentuk silindris memiliki banyak cabang dengan bentuk tajuk membulat dan tidak berbanir. Kulit luar berwarna coklat kehitaman, beralur dalam dan mengelupas. Kayu mahoni umumnya berwarna coklat kemerah-merahan dan lambat laun warnanya berubah menjadi lebih tua. Kayu mahoni termasuk kedalam kelas kuat II-III dengan berat jenis 0.61 (0.53 0.67) kg/mm³ (Mulyana, Rida. 2017). Sifat mekanis kayu mahoni dalam keadaan kering di tujukan dalam tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Sifat mekanis kayu mahoni (*swietenia macrophylla*)
(Mulyana, Rida. 2017)

Keterangan	Nilai	Satuan
Tegangan pada batas proposi	339	kg/cm ²
Tegangan pada batas patah	623	kg/cm ²
Modulus elastisitas	92	kg/cm ²
Usaha sampai batas proposi	0.7	kgm/dm ³
Usaha sampai batas patah	5.1	kgm/dm ³
Keteguhan pukul radial	14.7	kgm/dm ³
Keteguhan pukul tangensial	14.7	kgm/dm ³
Keteguhan tekan sejajar arah serat, tegangan maksimum	360	kg/cm ²
Kekerasan ujung	377	kg/cm ²
Kekerasan sisi	271	kg/cm ²
Keteguhan geser radial	40.2	kg/cm ²
Keteguhan geser tangensial	42.4	kg/cm ²
Keteguhan belah radial	51.8	kg/cm
Keteguhan belah tangensial	59.3	kg/cm
Keteguhan tarik tegak lurus arah serat radial	46.3	kg/cm ²

Keteguhan tarik tegak lurus arah serat tangensial	47.8	kg/cm ²
---	------	--------------------

2.9. Perhitungan Perancangan Bilah *Taperless*

Perhitungan bilah dimulai dengan proses input daya listrik yang akan direncanakan. Setelah itu, baru dilakukan input efisiensi bilah, efisiensi generator, efisiensi controller, dan efisiensi transmisi. Masing – masing nilai efisiensi yang diinputkan merupakan nilai efisiensi yang telah didapatkan dan diasumsikan sebelumnya dari data percobaan yang telah ada. Perhitungan perancangan bilah ini akan mendapatkan jari – jari yang setelah itu akan dilanjutkan perancangan geometri bilah. Pada perhitungan geometri bilah, sebelumnya akan dilakukan analisis menggunakan aplikasi *Qblade*. Sehingga hasil akhir dari proses perhitungan perancangan akan mendapatkan semua parameter yang diperlukan dalam pembuatan bilah nantinya.

2.9.1. Menentukan Kapasitas Daya dan Efisiensi Sistem

Untuk menentukan kapasitas daya turbin angin di dapatkan dari spesifikasi generator turbin angin yang akan di gunakan. Efisiensi bilah maksimum yang dapat diperoleh adalah sebesar 59,3% (Betz Limit), namun pada praktiknya bilah dengan desain terbaik setidaknya akan kehilangan daya yang dihasilkan sebesar 10% disebabkan oleh *drag*, Efisiensi transmisi, *loss* pada kabel yang dapat disebabkan oleh suhu yang tinggi, dan efisiensi generator yang disebabkan oleh gesekan mekanik pada generator dan komponen mekanik lainnya. Sedangkan efisiensi *controller* terjadi pada proses penyearahan oleh *rectifier*. Efisiensi sistem secara keseluruhan diperoleh dengan menggabungkan semua persentase daya yang diperoleh pada sistem, yaitu dengan mengalikannya seperti pada persamaan (2.1), diasumsikan nilai efisiensi transmisi, generator dan *controller* sebesar 0,9 Ingram (2011).

$$\eta \text{ Sistem} = \eta \text{ Bilah} \times \eta \text{ Transmisi} \times \eta \text{ Generator} \times \eta \text{ Controller} \quad (2.1)$$

Keterangan :

$$\eta \text{ Sistem} = \text{Efisiensi sistem (dasar perancangan bilah, hal 17)}$$

$$\eta \text{ Bilah} = \text{Efisiensi bilah}$$

$$\eta \text{ Transmisi} = \text{Efisiensi transmisi } \eta$$

$$\text{Generator} = \text{Efisiensi generator } \eta$$

$$\text{Controller} = \text{Efisiensi Controller}$$

2.9.2. Menentukan Jari-Jari Bilah

Jari-jari bilah yang diperlukan ditentukan dengan terlebih dahulu mencari nilai daya angin yang diperlukan untuk memenuhi sistem. Daya angin yang diperlukan dicari dengan persamaan (2.2). Daya angin diperlukan yang harus lebih besar dibandingkan daya listrik yang akan dihasilkan dengan memperhatikan *loss* pada sistem yang telah dihitung sebelumnya. Sebelum menentukan jari jari bilah maka harus menghitung luas sapuan bilah terlebih dahulu menggunakan persamaan (2.3), setelah itu baru bisa menentukan jari-jari bilah yang akan di gunakan menggunakan persamaan (2.4).

$$W_a = \frac{W_e}{\text{Efisiensi Sistem}} \dots\dots\dots(\text{dasar perancangan bilah, hal 18}) \quad (2.2)$$

Keterangan :

W_a = Kapasitas daya angin (watt)
 W_e = Kapasitas daya listrik (watt)

$$A = \frac{2 \cdot W_a}{\rho_{\text{udara}} \cdot V_{\text{max}}^3} \dots\dots\dots(\text{dasar perancangan bilah, hal 18}) \quad (2.3)$$

Keterangan :

A = Luas sapuan bilah (m²)
 W_a = Kapasitas daya angin (watt)
 ρ udara = Massa jenis udara = 1,225 (kg/m³)
 V_{max} = Kecepatan angin maksimal (m/s)

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \dots\dots\dots(\text{dasar perancangan bilah, hal 18}) \quad (2.4)$$

Keterangan :

R = Jari-jari bilah (m)
 A = Luas sapuan bilah (m²)
 π = phi = 3.14 atau $\frac{22}{7}$

2.9.3. Menentukan Tip Speed Ratio dan Airfoil

Tip Speed Ratio (TSR) ditentukan dengan menyesuaikan keperluan perancangan yaitu dari tipe turbin angin. Bilah yang akan dirancang adalah bilah untuk turbin angin tipe sumbu horizontal HAWT dengan 3 bilah sehingga *tip speed ratio* berkisar diantara nilai 5-8 (Hugh Piggott, 1997). Untuk *airfoil* di tentukan dengan menganalisis menggunakan *software Qblade* dengan memperhatikan pada grafik C_l/C_d terhadap alfa. Sedangkan untuk nilai C_l di dapat dari grafik C_l terhadap alfa dengan patokan menggunakan nilai alfa yang di dapat dari grafik C_l/C_d terhadap alfa. Dalam penelitian ini *airfoil* yang di gunakan yaitu *airfoil* NACA seri 44XX.

2.9.4. Membagi Elemen Bilah

Pembagian elemen bilah turbin angin menjadi n-elemen untuk memudahkan perhitungan geometri bilah dan untuk mempermudah pada saat proses manufaktur bilah. Pada umumnya pembagian elemen pada perancangan bilah berkisar antara 10-20 elemen, namun pada perancangan ini bilah dibagi menjadi 11 elemen.

2.9.5. Menghitung Jari-Jari Parsial

Jari-jari parsial bilah yaitu panjang elemen 0 atau bagian pangkal bilah disesuaikan dengan generator yang akan di gunakan yaitu TSD-500, sebesar 17 cm atau 0,17 meter. Sedangkan untuk elemen-elemen berikutnya disesuaikan agar memiliki panjang yang sama tiap elemennya dan panjang total bilah sesuai dengan jari-jari bilah yang akan di gunakan dengan menggunakan persamaan (2.5) berikut:

$$r = 0.17 + \left[\left(\frac{R-0.17}{n} \right) \times \text{elemen} \right] \dots (\text{dasar perancangan bilah, hal 36}) \quad (2.5)$$

Keterangan :

- r = Jari-jari parsial (m)
- 0.17 = Jarak antara bilah ke pusat rotor (m)
- R = Jari-jari bilah (m)

2.9.6. Menghitung TSR Parsial

TSR parsial adalah perbandingan kecepatan linear elemen bilah terhadap

kecepatan angin pada elemen yang berbeda. TSR parsial di hitung dengan menggunakan persamaan (2.6)

$$\lambda_r = \frac{r}{R} \lambda_R \dots\dots\dots(\text{dasar perancangan bilah, hal 37}) \quad (2.6)$$

Keterangan :

- λ_r = TSR parsial untuk setiap elemen
- r = Jari-jari parsial (m)
- R = Jari-jari bilah (m)
- λ_R = TSR bilah

2.9.7. Menghitung Sudut Serang/*Flow Angel*

Untuk nilai *flow angle* masing-masing elemen didapat dengan menggunakan persamaan (2.7) berikut:

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \dots\dots\dots(\text{dasar perancangan bilah, hal 41}) \quad (2.7)$$

Keterangan :

- ϕ = Sudut serang atau *flow angle* (°)
- λ_r = TSR parsial untuk setiap elemen

2.9.8. Menghitung Sudut Puntir/*Twist Angel*

Untuk nilai *twist* masing-masing elemen didapat dengan menggunakan persamaan (2.8) berikut:

$$\tau = \tau - \tau \dots\dots\dots(\text{dasar perancangan bilah, hal 42}) \quad (2.8)$$

Keterangan :

- τ = Sudut puntir atau *twist angle* (°)
- ϕ = Sudut serang atau *flow angle* (°)
- α = sudut serang angin terhadap (°)

Jika sudut puntir yang di dapat sangat ekstrim sehingga dapat mempersulit dalam proses manufaktur maka di perlukan linearisasi sudut puntir yang dilakukan pada 75% dari panjang bilah atau pada elemen ke-7 dan ke-8. Penelitian oleh Gibran (2015), menunjukkan bahwa metode linearisasi sudut puntir ini akan menghasilkan performa terbaik dibandingkan beberapa metode lainnya. Untuk mendapatkan performa terbaik

bilah jika di rasa masih kurang maka bisa menambahkan angka untuk menambah derajat kemiringan yang di simulasikan pada *Qblade* dengan melihat grafik C_p terhadap TSR.

2.9.9. Menghitung Lebar Bilah/*Chord*

Untuk nilai *chord* bilah tipe taper masing-masing elemen didapat dengan menggunakan persamaan (2.9) berikut:

$$C_r = \frac{16\pi \times R \times (R/r)}{9\lambda^2 \times B \times Cl} \dots\dots\dots(\text{dasar perancangan bilah, hal 42}) \quad (2.9)$$

Keterangan :

- C_r = Lebar bilah atau *Chord*
- λ = *Tip Speed Ratio (TSR)*
- r = Jari-jari parsial (m)
- R = Jari-jari bilah (m)
- Cl = koefisien lift
- B = banyak bilah

Untuk bilah tipe *taper* lebar bilah tidak dapat di asumsikan seperti bilah *taperless* maka di perlukan linearisasi kembali seperti pada sudut puntir yang dilakukan pada 75% dari panjang bilah atau pada elemen ke-7 dan ke-8. Tapi jika hasil linearisasi lebar bilah masih terlalu kecil sehingga tidak sesuai dengan lebar yang di butuhkan atau retan terjadi patah maka bisa melakukan penambahan lebar bilah namun tetap memperhatikan efisiensi.

2.9.10. Koreksi Lebar Bilah

Adanya sudut puntir maka lebar bilah untuk masing masing elemen diperlukan koreksi agar lebar bilah tetap pada lebar yang telah di hitung dan di linearisasi, maka koreksi lebar bilah di dapat dengan persamaan (2.10)

$$Z = \frac{C_r}{\cos\beta} \dots\dots\dots(\text{dasar perancangan bilah, hal 42}) \quad (2.10)$$

Keterangan :

- C_r = Lebar bilah atau *Chord*

- Z = koreksi lebar bilah
□ = Sudut puntir atau *twist angle*(^o)

Setelah mengkoreksi lebar bilah maka lebar bilah harus di konversi ke dalam satuan millimeter karena sebelumnya masih menggunakan satuan meter yang bertujuan untuk memudahkan dalam proses gambar 3D dan gambar teknik. Untuk skala dapat dilakukan dengan membagi hasil nilai Z dengan 100, angka 100 merupakan lebar chord dalam koordinat *airfoil*.

BAB III METODOLOGI

3.1 Alat

Alat yang digunakan pada perancangan ini yaitu berupa perangkat keras dan perangkat lunak. Adapun uraian dari perangkat yang digunakan adalah sebagai berikut:

3.1.1. Perangkat Keras (hardware)

1. Laptop/Komputer

Laptop/Komputer merupakan perangkat keras (*hardware*) yang digunakan dalam proses perancangan bilah turbin angin ini. Untuk mendukung proses perancangan, disarankan menggunakan laptop/computer yang spesifikasinya dapat menampung dan menjalankan aplikasi perangkat lunak (*software*) seperti *Solidwork*, *Qblade* dan aplikasi pendukung lainnya.

3.1.2. Perangkat Lunak (Software)

1. *Q-Blade v0.963*

QBlade adalah perangkat lunak perhitungan turbin angin sumber terbuka didistribusikan dibawah Lisensi Publik Umum GNU. Perangkat lunak diintegrasikan dengan mulus ke XFOIL, alat analisis dan desain *airfoil*. Tujuan dari perangkat lunak ini adalah desain dan simulasi aerodinamis dari bilah turbin angin. Integrase dalam XFOIL memungkinkan pengguna untuk cepat merancang *airfoil* khusus dan menghitung kurva kinerjanya, mengekstrapolasi data kinerja hingga kisaran 360° *Angle of attack*, dan secara langsung mengintegrasikanya ke dalam simulasi rotor turbin angin.

Qblade sangat menandai untuk pegajaran, karena memberikan perasaan ‘langsung’ untuk desain rotor HAWT dan menunjukkan semua hubungan mendasar antara putaran blade, chord blade, kinerja *airfoil* bagian, kontrol turbin, kurva daya dan beban dalam kurva yang mudah dan cara intuitif. *Qblade* juga mencakup pemrosesan pasca simulasi rotor yang dilakukan dan memberikan wawasan mendalam ke semua variable *blade* dan rotor yang relevan.

2. *Solidwork 2016*

Solidwork 2016 merupakan salah satu aplikasi perancangan gambar yang digunakan untuk merancang gambar bilah turbin angin. Setelah perhitungan

parameter dan input data yang dilakukan dalam perancangan bilah turbin angin. *Solidwork 2016* akan menghasilkan hasil rancangan gambar dalam bentuk dua dimensi dan nanti akan menjadi gambar teknik sebagai pedoman dalam pembuatan bilah nantinya.

3. *Notepad*

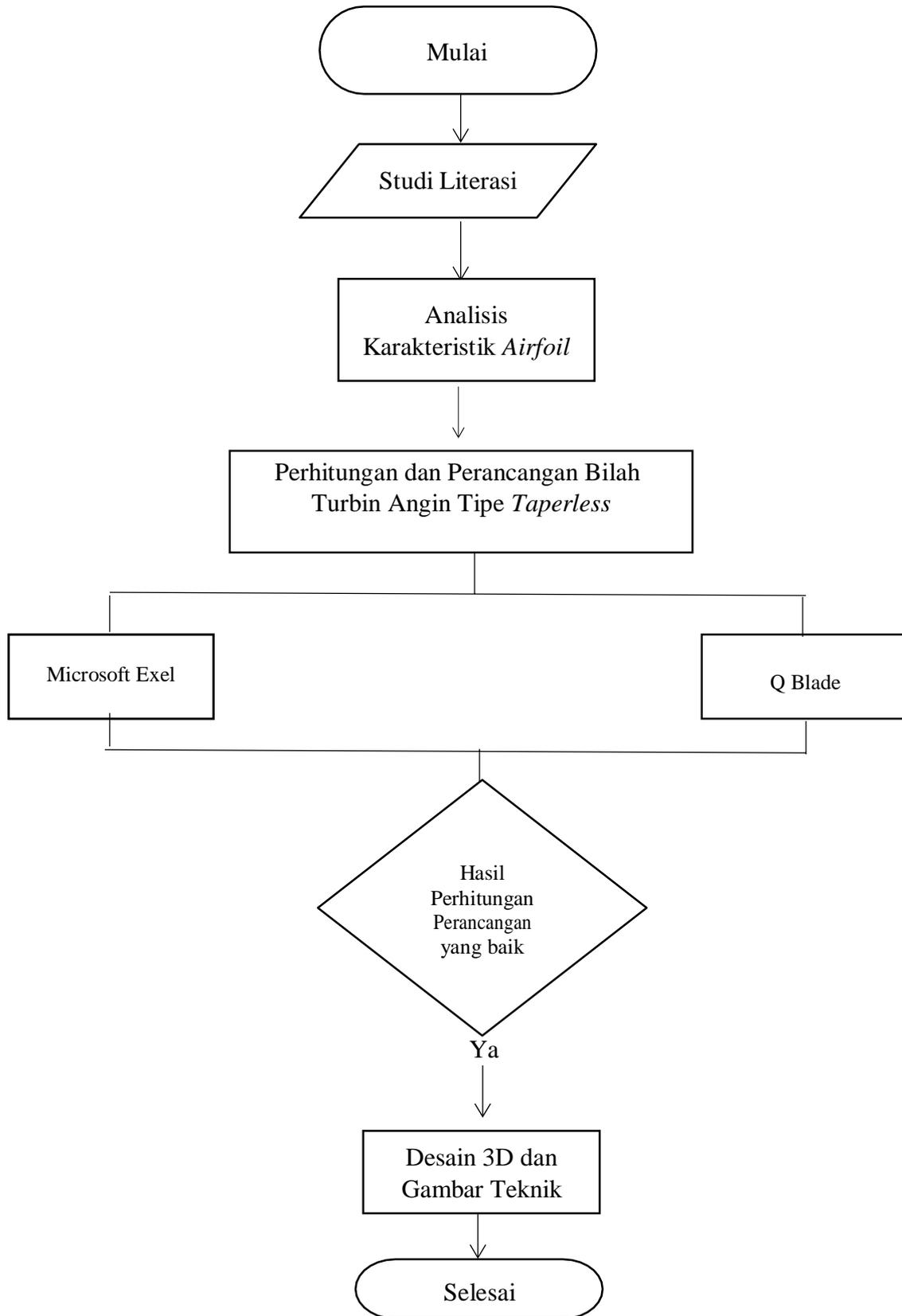
Notepad merupakan aplikasi yang dikemas satu paket bersama dengan system operasi *Microsoft Windows*, dan menjadi tanda stabilnya system *Windows*. *Notepad* adalah *software* editor *plain-text* yang dapat menyimpan *file* teks berekstensi '.txt'. Didalam berkas teks berekstensi. Txt tersebut tidak bisa dibuat *tag* ataupun *style* seperti menggunakan *Microsoft Word*.

4. *Snipping Tool*

Snipping Tool adalah aplikasi bawaan *windows* yang berfungsi untuk memotong objek gambar dan mengambbil gambar. Namun *tool* ini jarang dipakai maupun diketahui oleh pengguna *windows* kerana mungkin letaknya yang tidak *user friendly*. Selain itu saya akan mereview aplikasi yang sering saya pakai untuk mengambil *screenshot* gambar, aplikasi itu adalah *Lightshot*.

3.2. Diagram Alir

Dalam pembuatan tugas akhir yang berjudul “Perancangan Bilah Horizontal Axis Wind Turbine tipe *Taperless* Dengan *Airfoil* Naca 4412 untuk Daya 500 Watt” dapat dilihat pada gambar diagram dibawah ini.



Gambar 3.1. Diagram alir perancangan

3.3 Metodologi Pembuatan

Metodologi pembuatan laporan tugas akhir ini berisikan langkah proses perancangan dan pengumpulan referensi . Dalam sebuah metodologi terdapat urutan-urutan proses pengolahan data sehingga didapatkan hasil maupun kesimpulan. Adapun urutan proses tersebut adalah sebagai berikut::

3.3.1 Rumusan Masalah

Menurut pengamatan penulis, rumusan masalah yang penulis angkat dalam pembahasan laporan tugas akhir ini yaitu, perancangan bilah *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) tipe *Taperless* dengan *airfoil* NACA 4412 daya 500 Watt dengan kecepatan angin 10 m/s. Dalam perancangan bilah Turbin Angin ini menggunakan aplikasi perancangan yaitu *Solid Work* dan *QBlade* serta aplikasi pendukung lainnya.

3.3.2 Studi Literatur

Kemudian, dilanjutkan dengan melakukan studi literatur yang merujuk kepada beberapa referensi yang mendukung teori- teori yang berhubungan dengan perancangan bilah Turbin Angin : seperti buku, jurnal, *paper*, *e-book* dan *browsing internet*.

3.3.3 Pengumpulan Data

Mengumpulkan data apa saja yang dibutuhkan dalam proses perancangan Bilah Turbin Angin ini, yang merujuk kepada referensi yang telah dipelajari sebelumnya.

3.3.4 Pembuatan Laporan

Proses pembuatan laporan tugas akhir ini dalam bentuk tulisan yang membahas proses pengerjaan dan pengamatan yang telah dilakukan. Pembuatan laporan ini berpedoman pada penulisan laporan tugas akhir sebelumnya dan melalui bimbingan dari dosen pembimbing terkait. Pembuatan laporan didukung dengan referensi terkait tata bahasa, bahasa

yang digunakan harus sesuai dengan EYD yang berlaku dan pedoman penulisan lainnya.

3.3.5 Pembuatan Rancangan

Proses perancangan yang telah direncanakan pada laporan Tugas Akhir ini menggunakan beberapa aplikasi perangkat lunak. Aplikasi perangkat lunak yang digunakan antara seperti *software Qblade* untuk analisis karakteristik *airfoil* dan *software solidwork 2018* untuk perancangan gambar bilah bentuk 2D maupun 3D. Selain itu, juga ada beberapa aplikasi pendukung lainnya untuk mendukung proses pembuatan rancangan ini.

3.4 Waktu dan Tempat

Adapun waktu dan tempat pembuatan Tugas Akhir ini adalah di kampus Universitas Bung Hatta Padang. Dalam “Perancangan Bilah Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Angin Jenis *Taperless* Untuk Daya 500 Watt” dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.4 Jadwal Tugas Akhir

No	Kegiatan	2020/2021															
		November				Desember				Januari				Februari			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Pembuatan Proposal	■	■	■	■	■	■	■	■								
2	ACC Judul Proposal			■	■	■	■										
3	Konsultasi					■	■	■									
4	Pembuatan Bab I					■	■	■									
5	Pembuatan Bab II							■	■								
6	Pembuatan Bab III									■	■						
7	Pengajuan Seminar											■	■	■	■		
8	Seminar Proposal																

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Perhitungan Geometri Bilah

Perhitungan geometri bilah yaitu untuk mendapatkan nilai dari jari-jari bilah yang digunakan, jenis *airfoil*, lebar bilah (*chord*) dan sudut puntir (*twist*) yang akan diimplementasikan nantinya pada perancangan bilah.

4.1.1. Tabel Spesifikasi Menentukan Panjang Jari-jari Bilah

Tabel 4.1.1 Spesifikasi Jari-jari bilah

Daya Listrik	Efisiensi					Daya Angin	Kecepatan Angin Maksimal	Luas Sapuan Bilah	Jari jari	Jari jari yang digunakan	massa jenis udara
	Bilah	Transmisi	Generator	Controller	Sistem						
We	η	η	H	η	η	Wa	Vmax	A	R	R	ρ
500	0.3	1	0.9	0.9	0.24	2057.6	10	3.36	1.03	1	1.225
	0.4				0.32	1543.2		2.52	0.90		

4.1.2. Perhitungan Geometri Bilah untuk Menentukan Panjang Jari-Jari Bilah

Adapun langkah-langkah perhitungan geometri bilah untuk menentukan panjang jari-jari bilah yang akan digunakan pada perancangan bilah nantinya adalah sebagai berikut:

- 1) Langkah pertama, menentukan parameter geometri bilah yang akan dihitung untuk menentukan panjang jari-jari bilah dengan menggunakan *software* Microsoft Excel 2016 diantaranya yaitu:
 - a) Kapasitas daya listrik (We)
 - b) Efisiensi bilah (η)
 - c) Efisiensi transmisi (η)
 - d) Efisiensi generator (η)
 - e) Efisiensi *controller* (η)
 - f) Efisiensi sistem (η)
 - g) Daya angin (Wa) yang diperlukan untuk masing-masing efisiensi sistem
 - h) Kecepatan angin maksimal (V_{max}) dimana turbin akan beroperasi
 - i) Luas sapuan bilah (A) untuk masing-masing efisiensi sistem

- j) Jari-jari bilah (R) untuk masing-masing luas sapuan
- k) Jari-jari bilah (R) yang digunakan untuk perancangan bilah

- 2) Langkah kedua, memasukkan estimasi nilai kapasitas daya listrik (W_e) yang digunakan yaitu sebesar 500 watt. Nilai 500 watt ini didapat pada generator yang digunakan dengan kapasitas berapa watt.
- 3) Langkah ketiga, memasukkan nilai efisiensi bilah. Penelitian oleh Hau (Hau, 2013) menunjukkan bahwa kenaikan efisiensi dari desain 1 bilah ke 2 bilah adalah sekitar 10%, desain 2 bilah ke 3 bilah adalah sebesar 30-40%, dan desain 3 bilah ke 4 bilah adalah sebesar 10-20%. Karena pada perancangan ini menggunakan 3 buah bilah, maka nilai efisiensi bilah (η) sebesar 0,3 atau 30% untuk batas bawah dan sebesar 0,4 atau 40% untuk batas atas. Perhitungan geometri bilah dihitung dengan menggunakan 2 nilai efisiensi sistem yaitu dengan efisiensi bilah 0,3 dan 0,4 agar dapat diperoleh data jari-jari bilah minimal dan maksimal (Hau, 2013)
- 4) Langkah keempat, memasukkan nilai efisiensi transmisi (η), generator (η) dan *controller* (η). Menurut penelitian (Betz, 2013), untuk nilai efisiensi transmisi diasumsikan sebesar 1 atau 100% karena diasumsikan transmisi tidak ada *loss*, karena transmisi hanya berfungsi sebagai meneruskan energi gerak dari bilah ke generator untuk menghasilkan energi listrik. Sedangkan untuk efisiensi generator dan *controller* sendiri diasumsikan sebesar 0,9 atau 90% karena pada umumnya generator akan mengalami rugi-rugi besi dan *controller* ada komponen elektronik yang berfungsi merubah arus AC menjadi DC yang dinamakan *rectifier*. Didalam setiap rangkaian *rectifier* ada diode, diode inilah yang akan menyebabkan rugi-rugi *rectifier* nantinya.
- 5) Langkah kelima, mengitung nilai efisiensi sistem (η_{Sistem}) dengan menggunakan persamaan (1) sebagai berikut:

$$\text{Diketahui: } \eta_{\text{Bilah1}} = 0,3 = 30 \%$$

$$\eta_{\text{Bilah2}} = 0,4 = 40 \%$$

$$\eta_{\text{Transmisi}} = 1 = 100\%$$

$$\eta_{\text{Generator}} = 0,9 = 90 \%$$

$$\eta_{\text{Controller}} = 0,9 = 90 \%$$

$$\begin{aligned}
\eta_{\text{Sistem1}} &= \eta_{\text{Bilah1}} \times \eta_{\text{Transmisi}} \times \eta_{\text{Generator}} \times \eta_{\text{Controller}} \\
&= 0,3 \times 1 \times 0,9 \times 0,9 \\
&= 0,24 \\
&= 24 \%
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\eta_{\text{Sistem2}} &= \eta_{\text{Bilah2}} \times \eta_{\text{Transmisi}} \times \eta_{\text{Generator}} \times \eta_{\text{Controller}} \\
&= 0,4 \times 1 \times 0,9 \times 0,9 \\
&= 0,32 \\
&= 32 \%
\end{aligned}$$

Sehingga diperoleh nilai efisiensi sistem batas bawah sebesar 0,24 atau 24% dan nilai efisiensi sistem batas atas sebesar 0,32 atau 32%.

- 6) Langkah keenam, menghitung daya angin (W_a) yang diperlukan untuk masing-masing efisiensi sistem dengan menggunakan persamaan (2) sebagai berikut:

Diketahui: $W_e = 500$ watt

$$W_{a1} = \frac{W_e}{\eta_{1\text{Sistem}}} = \frac{500}{0,24} = 2057,6 \text{ watt}$$

$$W_{a2} = \frac{W_e}{\eta_{2\text{Sistem}}} = \frac{500}{0,32} = 1543,2 \text{ watt}$$

Sehingga diperoleh nilai daya angin yang diperlukan untuk efisiensi sistem batas bawah sebesar 2057,6 watt dan untuk efisiensi sistem batas atas sebesar 1543,2 watt.

- 7) Langkah ketujuh, memasukkan besar kecepatan angin maksimal (V_{max}) dimana turbin akan beroperasi, karena penulis merancang bilah untuk di daerah Semarang yang mana pada tahun 2012 kecepatan angin maksimum di daerah Semarang mencapai 10,20 meter per detik dan pada tahun 2013 mencapai 10,30 meter per detik (BPS, 2017). Maka, penulis menggunakan besar kecepatan angin maksimal yaitu sebesar 10 m/s.

- 8) Langkah kedelapan, menghitung luas sapuan bilah (A) untuk masing-masing efisiensi sistem dengan persamaan (3) sebagai berikut:

$$\text{Diketahui: } \rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{\text{max}} = 10 \text{ m/s}$$

$$A1 = \frac{2 W_{a1}}{\rho V_{\text{max}}^3} = \frac{2 \times 2057,6}{1,225 \times 10^3} = \frac{4115,2}{1225} = 3,36 \text{ m}^2$$

$$A2 = \frac{2 W_{a2}}{\rho V_{\text{max}}^3} = \frac{2 \times 1543,2}{1,225 \times 10^3} = \frac{3086,4}{1225} = 2,52 \text{ m}^2$$

Sehingga diperoleh luas sapuan bilah untuk batas bawah sebesar $3,36 \text{ m}^2$ dan untuk batas atas sebesar $2,52 \text{ m}^2$.

- 9) Langkah kesembilan, menghitung nilai jari-jari bilah (R) untuk masing-masing luas sapuan dengan persamaan (4) sebagai berikut:

$$\text{Diketahui: } \pi = 3,14$$

$$R1 = \sqrt{\frac{A1}{\pi}} = \sqrt{\frac{3,36}{3,14}} = \sqrt{1,07} = 1,03 \text{ m}$$

$$R2 = \sqrt{\frac{A2}{\pi}} = \sqrt{\frac{2,52}{3,14}} = \sqrt{1,80} = 0,90 \text{ m}$$

Sehingga diperoleh nilai jari-jari bilah untuk luas sapuan batas bawah sebesar 1,03 meter dan untuk luas sapuan batas atas sebesar 0,90 meter.

- 10) Langkah terakhir, memasukkan nilai jari-jari bilah yang akan digunakan pada perancangan berdasarkan perhitungan sebelumnya, dengan mengambil nilai tengah atau nilai yang sederhana dari perhitungan jari-jari bilah yang didapat, sehingga diperoleh panjang jari-jari bilah yang digunakan pada perancangan sebesar 1 meter.

Untuk melihat tabel perhitungan geometri bilah dalam menentukan panjang jari-jari bilah menggunakan *software* Microsoft Excel 2010 dapat dilihat pada lampiran (1).

4.1.3. Perhitungan Geometri Bilah untuk Mendapatkan Nilai Lebar Bilah dan Analisis Karakteristik *Airfoil* untuk Menentukan *Airfoil* yang Digunakan

Adapun langkah-langkah perhitungan geometri bilah untuk menentukan nilai lebar bilah dan analisis karakteristik *airfoil* untuk menentukan *airfoil* yang digunakan adalah sebagai berikut:

- 1) Langkah pertama, menentukan parameter geometri bilah yang akan dimasukkan dan dihitung untuk mendapatkan nilai lebar bilah dan analisis karakteristik *airfoil* untuk menentukan *airfoil* yang digunakan dengan menggunakan *software* Microsoft Excel 2010 dan *software* QBlade v0.963 diantaranya yaitu:
 - a) *Tip speed ratio* (TSR)
 - b) Jenis *airfoil*
 - c) *Coefficient lift/ coefficient drag* (Cl/Cd)
 - d) Lebar bilah (*Chord/Cr*)
 - e) Jumlah bilah (B)

Tabel 4.1.3 Parameter Geometri Bilah

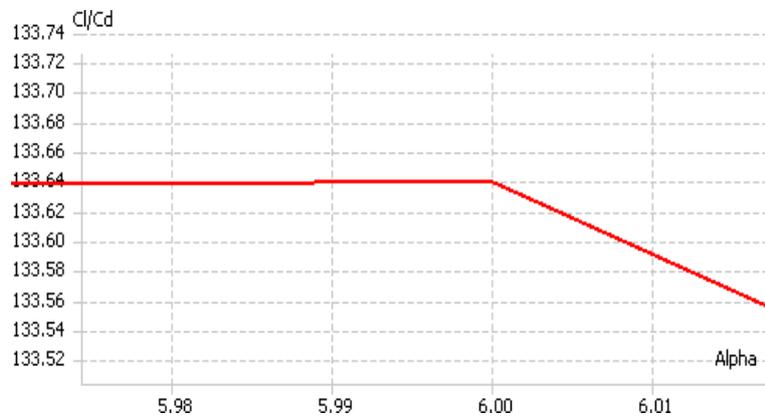
Tip Speed Ratio (TSR)	Air foil	Cl/Cd	Chord (Cr)	Jumlah Bilah (B)
λR			M	
7			441 2	

- 2) Langkah kedua, memasukkan nilai *tip speed ratio* (TSR) yang akan digunakan pada proses perhitungan geometri bilah. Untuk nilai TSR ditentukan dengan menyesuaikan keperluan perancangan yaitu dari tipe turbin angin. Bilah yang akan dirancang adalah bilah untuk turbin angin tipe sumbu *horizontal axis wind turbine* (HAWT) dengan 3 bilah sehingga TSR berkisar diantara nilai 5-8 (Hugh Piggott, 1997). Maka untuk nilai TSR pada perancangan ini menggunakan TSR 7.
- 3) Langkah ketiga, memasukkan jenis *airfoil* yang akan digunakan dengan cara

menganalisa karakteristik *airfoil* dengan menggunakan *software QBlade*

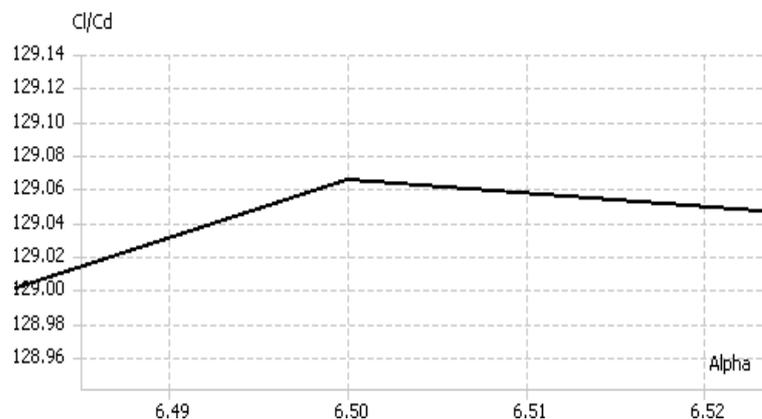
$\nu 0.963$. Untuk pemilihan *airfoil* yang akan digunakan pada bilah ditentukan dengan berdasarkan rasio Cl/Cd *airfoil* yang tinggi dan insensitivitas terhadap perubahan sudut. Analisa karakteristik *airfoil* dilakukan terhadap beberapa *airfoil* yaitu NACA 4412, 4415 dan 4418 dengan menggunakan bilangan reynold *default*. sehingga diperoleh hasil analisis karakteristik *airfoil* sebagai berikut:

- a) Hasil analisa karakteristik *airfoil* pada grafik Cl/Cd terhadap alpha pada *airfoil* NACA 4412 menunjukkan puncak tertinggi dengan rasio Cl/Cd sebesar 133,64 pada alpha $6,0^\circ$ seperti pada gambar (4.1) dibawah ini.



Gambar 4.1 Grafik Cl/Cd terhadap alpha *airfoil* NACA 4412

- b) Hasil analisa karakteristik *airfoil* pada grafik Cl/Cd terhadap alpha pada *airfoil* NACA 4415 menunjukkan puncak tertinggi dengan rasio Cl/Cd sebesar 129,07 pada alpha $6,5^\circ$ seperti pada gambar (4.2) dibawah ini.



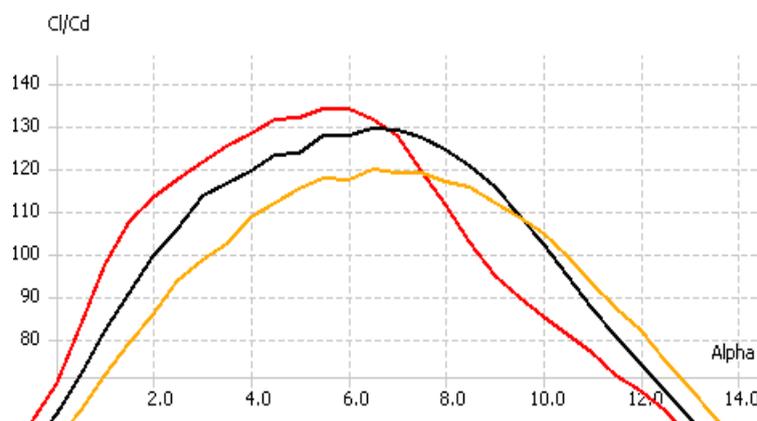
Gambar 4.2 Grafik Cl/Cd terhadap alpha *airfoil* NACA 4415

- c) Hasil analisa karakteristik *airfoil* pada grafik Cl/Cd terhadap alpha pada *airfoil* NACA 4418 menunjukkan puncak tertinggi dengan rasio Cl/Cd sebesar 119,34 pada alpha $6,5^\circ$ seperti pada gambar (4.3) dibawah ini.



Gambar 4.3 Grafik Cl/Cd terhadap alpha *airfoil* NACA 4418

Pada grafik perbandingan Cl/Cd terhadap alpha masing-masing jenis *airfoil*, terlihat pada gambar (4.4) bahwa nilai *coefficient lift/coefficient drag airfoil* NACA 4412 lebih tinggi dibandingkan dengan *airfoil* NACA 4415 dan NACA 4418.



Gambar 4.4 Grafik perbandingan Cl/Cd terhadap alpha masing-masing jenis *airfoil*

Menurut penelitian (LAN, 2014) semakin tinggi perbandingan Cl/Cd terhadap alpha, maka semakin tinggi pula efisiensi bilah tersebut dan juga kemudahan dalam manufacturing bilah tersebut, sehingga perancangan ini menggunakan jenis *airfoil* NACA 4412 dengan perbandingan Cl/Cd terhadap alpha sebesar 133,64 pada alpha 6,0

- 4) Langkah keempat, menentukan nilai Cl/Cd dengan cara memasukkan CL/CD tertinggi dari *airfoil* NACA 4412 yang telah didapat melalui analisa karakteristik *airfoil* yaitu sebesar 133,64.
- 5) Langkah kelima, menentukan lebar bilah (*Chord/Cr*). Untuk lebar bilah sendiri menurut (Piggott, 1997) yaitu 10% sampai 15% dari panjang bilah, karena panjang bilah yang digunakan adalah 1 m, maka untuk lebar bilah berkisar 0,10 sampai 0,15

atau 10 cm sampai 15 cm. Untuk perancangan bilah ini penulis menggunakan lebar bilah sebesar 12 cm atau 0,12 m.

- 6) Langkah terakhir memasukkan nilai jumlah bilah yang akan dibuat yaitu dengan jumlah bilah 3 buah. Karena menurut penelitian (Hau, 2013) menunjukkan bahwa kenaikan efisiensi dari desain 1 bilah ke 2 bilah adalah sekitar 10%, desain 2 bilah ke 3 bilah adalah sebesar 30-40%, dan desain 3 bilah ke 4 bilah adalah sebesar 10-20%. Maka penulis menggunakan perancangan bilah dengan jumlah 3 buah yang mana mempunyai efisiensi bilahnya sebesar 30-40%.

Untuk melihat tabel perhitungan geometri bilah untuk mendapatkan nilai lebar bilah dan analisis karakteristik *airfoil* untuk menentukan *airfoil* yang digunakan menggunakan *software* Microsoft Excel 2010 dapat dilihat pada lampiran (2).

4.1.4 Perhitungan Geometri Bilah untuk Mendapatkan Nilai Sudut Puntir Bilah

Adapun langkah-langkah perhitungan geometri bilah untuk mendapatkan nilai sudut puntir bilah adalah sebagai berikut:

- 1) Langkah pertama, menentukan parameter geometri bilah yang akan dihitung untuk mendapatkan nilai sudut puntir bilah dengan menggunakan *software* Microsoft Excel 2010 diantaranya yaitu:
 - a) Elemen bilah (n)
 - b) Jari-jari parsial (r)
 - c) TSR parsial (λr) untuk tiap-tiap elemen bilah
 - d) *Coefficient lift* (Cl) untuk tiap-tiap elemen bilah
 - e) Alpha (α) untuk masing-masing nilai Cl
 - f) *Flow angle* (\emptyset) untuk tiap-tiap elemen bilah
 - g) *Twist* (β) untuk tiap-tiap elemen bilah
 - h) *Twist linier* (β) 75%
 - i) *Twist optimum* (β)
- 2) Langkah kedua, membagi bilah menjadi beberapa elemen bilah (n). Menurut (LAN, 2016) pada umumnya pembagian elemen pada perancangan bilah berkisar antara 10-20 elemen, namun pada perancangan ini bilah dibagi menjadi 10 elemen. Pembagian elemen ini dilakukan untuk mempermudah pada saat proses manufaktur bilah.
- 3) Langkah ketiga, menghitung jari-jari parsial (r) untuk tiap-tiap elemen bilah dengan menggunakan persamaan (5) sebagai berikut:

Diketahui: r elemen 0 = 0,170 meter

$$R = 1 \text{ meter}$$

jumlah elemen = 10 elemen

$$r_1 = r \text{ dari elemen } 0 + \left[\left(\frac{R - r \text{ dari elemen } 0}{\text{jumlah elemen}} \right) \right] \times (\text{elemen})$$

$$= 0,170 + \left[\left(\frac{1 - 0,170}{10} \right) \right] \times (1)$$

$$= 0,170 + [(0,083) \times (1)]$$

$$= 0,170 + 0,083$$

$$= 0,253 \text{ m}$$

$$r_2 = r \text{ dari elemen } 0 + \left[\left(\frac{R - r \text{ dari elemen } 0}{\text{jumlah elemen}} \right) \right] \times (\text{elemen})$$

$$= 0,170 + \left[\left(\frac{1 - 0,170}{10} \right) \right] \times (2)$$

$$= 0,170 + [(0,083) \times (2)]$$

$$= 0,170 + 0,166$$

$$= 0,336 \text{ m}$$

$$r_3 = r \text{ dari elemen } 0 + \left[\left(\frac{R - r \text{ dari elemen } 0}{\text{jumlah elemen}} \right) \right] \times (\text{elemen})$$

$$= 0,170 + \left[\left(\frac{1 - 0,170}{10} \right) \right] \times (3)$$

$$= 0,170 + [(0,083) \times (3)]$$

$$= 0,170 + 0,249$$

$$= 0,419 \text{ m}$$

$$r_4 = r \text{ dari elemen } 0 + \left[\left(\frac{R - r \text{ dari elemen } 0}{\text{jumlah elemen}} \right) \right] \times (\text{elemen})$$

$$= 0,170 + \left[\left(\frac{1 - 0,170}{10} \right) \right] \times (4)$$

$$= 0,170 + [(0,083) \times (4)]$$

$$= 0,170 + 0,332$$

$$= 0,502 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
r_5 &= r \text{ dari elemen } 0 + \left[\left(\frac{R - r \text{ dari elemen } 0}{\text{jumlah elemen}} \right) \right] \times (\text{elemen}) \\
&= 0,170 + \left[\left(\frac{1 - 0,170}{10} \right) \right] \times (5) \\
&= 0,170 + [(0,083) \times (5)] \\
&= 0,170 + 0,415 \\
&= 0,585 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r_6 &= r \text{ dari elemen } 0 + \left[\left(\frac{R - r \text{ dari elemen } 0}{\text{jumlah elemen}} \right) \right] \times (\text{elemen}) \\
&= 0,170 + \left[\left(\frac{1 - 0,170}{10} \right) \right] \times (6) \\
&= 0,170 + [(0,083) \times (6)] \\
&= 0,170 + 0,498 \\
&= 0,668 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r_7 &= r \text{ dari elemen } 0 + \left[\left(\frac{R - r \text{ dari elemen } 0}{\text{jumlah elemen}} \right) \right] \times (\text{elemen}) \\
&= 0,170 + \left[\left(\frac{1 - 0,170}{10} \right) \right] \times (7) \\
&= 0,170 + [(0,083) \times (7)] \\
&= 0,170 + 0,581 \\
&= 0,751 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r_8 &= r \text{ dari elemen } 0 + \left[\left(\frac{R - r \text{ dari elemen } 0}{\text{jumlah elemen}} \right) \right] \times (\text{elemen}) \\
&= 0,170 + \left[\left(\frac{1 - 0,170}{10} \right) \right] \times (8) \\
&= 0,170 + [(0,083) \times (8)] \\
&= 0,170 + 0,664 \\
&= 0,834 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r_9 &= r \text{ dari elemen } 0 + \left[\left(\frac{R - r \text{ dari elemen } 0}{\text{jumlah elemen}} \right) \right] \times (\text{elemen}) \\
&= 0,170 + \left[\left(\frac{1 - 0,170}{10} \right) \right] \times (9) \\
&= 0,170 + [(0,083) \times (9)] \\
&= 0,170 + 0,747
\end{aligned}$$

$$= 0,917 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} r_{10} &= r \text{ dari elemen } 0 + \left[\left(\frac{R - r \text{ dari elemen } 0}{\text{jumlah elemen}} \right) \right] \times (\text{elemen}) \\ &= 0,170 + \left[\left(\frac{1 - 0,170}{10} \right) \right] \times (10) \\ &= 0,170 + [(0,083) \times (10)] \\ &= 0,170 + 0,830 \\ &= 1 \text{ m} \end{aligned}$$

Untuk nilai jari-jari parsial elemen 0 diasumsikan yaitu 0,17 meter yang mana angka tersebut adalah angka hasil penyesuaian terhadap jari-jari generator turbin angin *the sky dancer* (TSD) 500 watt yang ada di PT Lentera Bumi Nusantara. Sedangkan nilai dari elemen 1 sampai 10 (jari-jari parsial) didapat dengan menggunakan persamaan (5). Untuk nilai jari-jari parsial yang ke-10, pastikan nilainya sama dengan jari-jari bilah yang akan digunakan pada perancangan bilah.

- 4) Langkah keempat, menghitung TSR parsial untuk tiap-tiap elemen bilah (λ_r) dengan menggunakan persamaan (6) sebagai berikut:

$$\text{Diketahui: } \lambda_R = 7$$

$$\lambda_{r0} = \frac{r_0}{R} \times \lambda_R = \frac{0,170}{1} \times 7 = 0,170 \times 7 = 1,19$$

$$\lambda_{r1} = \frac{r_1}{R} \times \lambda_R = \frac{0,253}{1} \times 7 = 0,253 \times 7 = 1,77$$

$$\lambda_{r2} = \frac{r_2}{R} \times \lambda_R = \frac{0,336}{1} \times 7 = 0,336 \times 7 = 2,35$$

$$\lambda_{r3} = \frac{r_3}{R} \times \lambda_R = \frac{0,419}{1} \times 7 = 0,419 \times 7 = 2,93$$

$$\lambda_{r4} = \frac{r_4}{R} \times \lambda_R = \frac{0,502}{1} \times 7 = 0,502 \times 7 = 3,51$$

$$\lambda_{r5} = \frac{r_5}{R} \times \lambda_R = \frac{0,585}{1} \times 7 = 0,585 \times 7 = 4,10$$

$$\lambda_{r6} = \frac{r6}{R} \times \lambda R = \frac{0,668}{1} \times 7 = 0,668 \times 7 = 4,68$$

$$\lambda_{r7} = \frac{r7}{R} \times \lambda R = \frac{0,751}{1} \times 7 = 0,751 \times 7 = 5,26$$

$$\lambda_{r8} = \frac{r8}{R} \times \lambda R = \frac{0,834}{1} \times 7 = 0,834 \times 7 = 5,84$$

$$\lambda_{r9} = \frac{r9}{R} \times \lambda R = \frac{0,917}{1} \times 7 = 0,917 \times 7 = 6,42$$

$$\lambda_{r10} = \frac{r10}{R} \times \lambda R = \frac{1}{1} \times 7 = 1 \times 7 = 7$$

Pastikan nilai pada elemen ke-10 TSR parsial sama dengan nilai TSR bilah yaitu TSR 7.

- 5) Langkah kelima, menghitung nilai *coefficient lift* (Cl) untuk tiap-tiap elemen bilah dengan menggunakan persamaan (7) sebagai berikut:

Diketahui: B = 3

Cr = 0,12 m

$$\begin{aligned} Cl0 &= \frac{16\pi \times R \times \left(\frac{R}{r0}\right)}{9\lambda R^2 \times B \times Cr} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times \left(\frac{1}{0,170}\right)}{9 \times 7^2 \times 3 \times 0,12} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times 5,89}{9 \times 49 \times 3 \times 0,12} \\ &= \frac{295,92}{158,76} = 1,86 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Cl1 &= \frac{16\pi \times R \times \left(\frac{R}{r1}\right)}{9\lambda R^2 \times B \times Cr} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times \left(\frac{1}{0,253}\right)}{9 \times 7^2 \times 3 \times 0,12} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times 3,95}{9 \times 49 \times 3 \times 0,12} \\ &= \frac{198,45}{158,76} = 1,25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Cl2 &= \frac{16\pi \times R \times \left(\frac{R}{r2}\right)}{9\lambda R^2 \times B \times Cr} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times \left(\frac{1}{0,336}\right)}{9 \times 7^2 \times 3 \times 0,12} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times 2,98}{9 \times 49 \times 3 \times 0,12} \\ &= \frac{149,72}{158,76} = 0,94 \end{aligned}$$

$$C_{13} = \frac{16\pi \times R \times \frac{R}{(r_3)}}{9\lambda R^2 \times B \times Cr} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times \left(\frac{1}{0,419}\right)}{9 \times 7^2 \times 3 \times 0,12} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times 2,39}{9 \times 49 \times 3 \times 0,12}$$

$$= \frac{120,07}{158,76} = 0,76$$

$$C_{14} = \frac{16\pi \times R \times \frac{R}{(r_4)}}{9\lambda R^2 \times B \times Cr} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times \left(\frac{1}{0,502}\right)}{9 \times 7^2 \times 3 \times 0,12} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times 1,99}{9 \times 49 \times 3 \times 0,12}$$

$$= \frac{99,98}{158,76} = 0,63$$

$$C_{15} = \frac{16\pi \times R \times \frac{R}{(r_5)}}{9\lambda R^2 \times B \times Cr} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times \left(\frac{1}{0,585}\right)}{9 \times 7^2 \times 3 \times 0,12} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times 1,71}{9 \times 49 \times 3 \times 0,12}$$

$$= \frac{85,91}{158,76} = 1,86$$

$$C_{16} = \frac{16\pi \times R \times \frac{R}{(r_6)}}{9\lambda R^2 \times B \times Cr} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times \left(\frac{1}{0,668}\right)}{9 \times 7^2 \times 3 \times 0,12} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times 1,50}{9 \times 49 \times 3 \times 0,12}$$

$$= \frac{75,36}{158,76} = 0,47$$

$$C_{17} = \frac{16\pi \times R \times \frac{R}{(r_7)}}{9\lambda R^2 \times B \times Cr} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times \left(\frac{1}{0,751}\right)}{9 \times 7^2 \times 3 \times 0,12} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times 1,33}{9 \times 49 \times 3 \times 0,12}$$

$$= \frac{66,82}{158,76} = 0,42$$

$$C_{18} = \frac{16\pi \times R \times \frac{R}{(r_8)}}{9\lambda R^2 \times B \times Cr} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times \left(\frac{1}{0,834}\right)}{9 \times 7^2 \times 3 \times 0,12} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times 1,20}{9 \times 49 \times 3 \times 0,12}$$

$$= \frac{60,29}{158,76} = 0,38$$

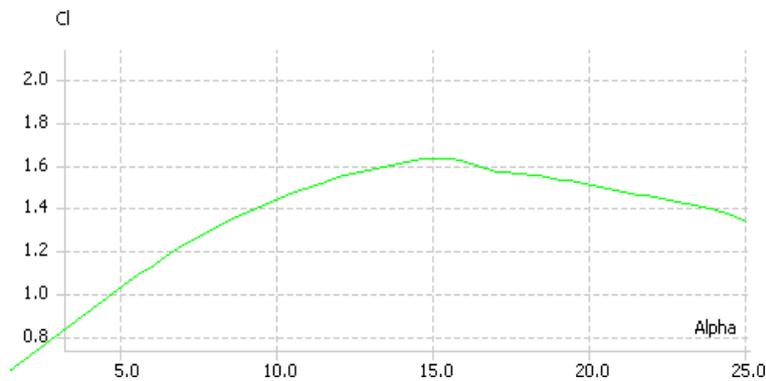
$$C_{19} = \frac{16\pi \times R \times \frac{R}{(r_9)}}{9\lambda R^2 \times B \times Cr} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times \left(\frac{1}{0,917}\right)}{9 \times 7^2 \times 3 \times 0,12} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times 1,09}{9 \times 49 \times 3 \times 0,12}$$

$$= \frac{54,76}{158,76} = 0,35$$

$$C_{l10} = \frac{16\pi \times R \times \left(\frac{R}{r}\right)^2}{9\lambda R^2 \times B \times C_r} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times 1}{9 \times 7^2 \times 3 \times 0,12} = \frac{16 \times 3,14 \times 1 \times 1}{9 \times 49 \times 3 \times 0,12}$$

$$= \frac{50,24}{158,76} = 0,32$$

6) Langkah keenam, memasukkan nilai Alpha (α) untuk masing-masing nilai Cl dengan cara menggunakan grafik Cl terhadap alpha pada *software* QBlade v0.963. Apabila nilai Cl tidak berasosiasi dengan nilai alpha, maka gunakan nilai alpha tertinggi. Seperti nilai Cl untuk elemen ke-1 seperti gambar (4.5) dibawah ini.



Gambar 4.5 Grafik Cl terhadap alpha pada elemen ke-1

Untuk nilai Cl pada elemen ke-0 telah didapatkan melalui hasil perhitungan sebelumnya sebesar 1,8, maka untuk mencari nilai alpha elemen ke-1 yaitu dengan melihat grafik Cl terhadap alpha. Dilihat pada grafik untuk Cl tertinggi tidak sampai sebesar 1,8, maka untuk nilai alpanya menggunakan nilai alpha yang memiliki nilai paling tinggi yaitu sebesar 15. Untuk mencari nilai alpha elemen ke-1 sampai ke-10 sama seperti gambar (4.5) diatas.

7) Langkah ketujuh, menghitung nilai dari *flow angle* (\emptyset) untuk tiap-tiap elemen bilah dengan menggunakan persamaan (8) sebagai berikut:

$$\emptyset_0 = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda r_0} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{1,19} = \frac{2}{3} (\tan^{-1} 0,84) = \frac{2}{3} (40,03) = 26,69^\circ$$

$$\emptyset_1 = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda r_1} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{1,77} = \frac{2}{3} (\tan^{-1} 0,564) = \frac{2}{3} (29,45) = 19,63^\circ$$

$$\emptyset_2 = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda r_2} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{2,35} = \frac{2}{3} (\tan^{-1} 0,4255) = \frac{2}{3} (23,497) = 15,36^\circ$$

$$\emptyset_3 = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_{r3}} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{2,93} = \frac{2}{3} (\tan 0,341) = \frac{2}{3} (18,829) = 12,55^\circ$$

$$\emptyset_4 = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_{r4}} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{3,51} = \frac{2}{3} (\tan 0,2849) = \frac{2}{3} (15,9) = 10,59^\circ$$

$$\emptyset_5 = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_{r5}} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{4,10} = \frac{2}{3} (\tan 0,244) = \frac{2}{3} (13,72) = 9,15^\circ$$

$$\emptyset_6 = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_{r6}} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{4,68} = \frac{2}{3} (\tan 0,2137) = \frac{2}{3} (12,07) = 8,05^\circ$$

$$\emptyset_7 = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_{r7}} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{5,26} = \frac{2}{3} (\tan 0,19) = \frac{2}{3} (10,78) = 7,18^\circ$$

$$\emptyset_8 = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_{r8}} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{5,84} = \frac{2}{3} (\tan 0,1712) = \frac{2}{3} (9,715) = 6,48^\circ$$

$$\emptyset_9 = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_{r9}} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{6,42} = \frac{2}{3} (\tan 0,1557) = \frac{2}{3} (8,85) = 5,9^\circ$$

$$\emptyset_{10} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_{r10}} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{7} = \frac{2}{3} (\tan 0,1428) = \frac{2}{3} (8,13) = 5,42^\circ$$

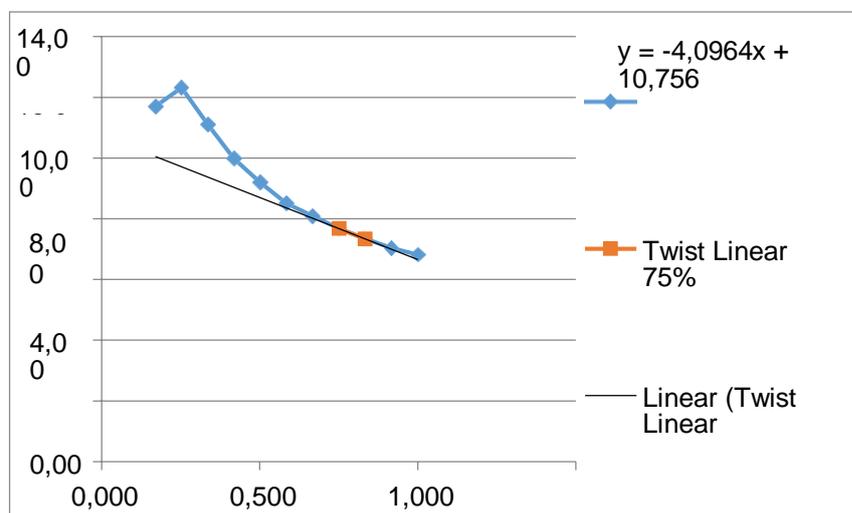
8) Langkah kedelapan, menghitung nilai *twist* (β) untuk tiap-tiap elemen bilah dengan menggunakan persamaan (9) sebagai berikut:

Diketahui: $\alpha_0 = 15^\circ$	$\alpha_6 = -0,04^\circ$
$\alpha_1 = 7,32^\circ$	$\alpha_7 = -0,50^\circ$
$\alpha_2 = 14,24^\circ$	$\alpha_8 = -0,86^\circ$
$\alpha_3 = 2,57^\circ$	$\alpha_9 = -1,13^\circ$
$\alpha_4 = 1,40^\circ$	$\alpha_{10} = -1,40^\circ$
$\alpha_5 = 0,64^\circ$	

$$\beta_{t0} = \emptyset_0 - \alpha_0 = 26,69^\circ - 15^\circ = 11,69^\circ$$

$$\begin{aligned}\beta t1 &= \emptyset 1 - \alpha 1 = 19,63^\circ - 7,32^\circ = 12,31^\circ \\ \beta t2 &= \emptyset 2 - \alpha 2 = 15,36^\circ - 4,24^\circ = 11,12^\circ \\ \beta t3 &= \emptyset 3 - \alpha 3 = 12,55^\circ - 2,57^\circ = 9,98^\circ \\ \beta t4 &= \emptyset 4 - \alpha 4 = 10,59^\circ - 1,40^\circ = 9,19^\circ \\ \beta t5 &= \emptyset 5 - \alpha 5 = 9,15^\circ - 0,64^\circ = 8,51^\circ \\ \beta t6 &= \emptyset 6 - \alpha 6 = 8,05^\circ - (-0,04^\circ) = 8,09^\circ \\ \beta t7 &= \emptyset 7 - \alpha 7 = 7,18^\circ - (-0,50^\circ) = 7,68^\circ \\ \beta t8 &= \emptyset 8 - \alpha 8 = 6,48^\circ - (-0,86^\circ) = 7,34^\circ \\ \beta t9 &= \emptyset 9 - \alpha 9 = 5,90^\circ - (-1,13^\circ) = 7,03^\circ \\ \beta t10 &= \emptyset 10 - \alpha 10 = 5,42^\circ - (-1,40^\circ) = 6,82^\circ\end{aligned}$$

- 9) Langkah kesembilan, nilai *twist* yang diperoleh kemudian dilinearisasikan pada posisi 75% dari panjang bilah atau titik ke-7 dan ke-8, dan diperoleh hasil linearisasi *twist* pada 75% dengan persamaan linear $y = -4,0964x + 10,756$. Dalam hal ini, y adalah *twist* terlinearisasi dan x adalah nilai jari-jari parsial tiap elemen yang diperoleh sebelumnya. Linearisasi *twist* ini diperlukan untuk memudahkan proses manufaktur bilah secara manual, namun tetap mempertimbangkan performa bilah.



Gambar 4.6 Grafik linearisasi *twist* 75%

- 10) Langkah terakhir, setelah melakukan linearisasi *twist* 75% maka nilai hasil linearisasi y dikalikan dengan nilai jari-jari parsial lalu ditambah dengan nilai linearisasi x , sehingga didapat nilai *twist optimum* yang digunakan sebagai sudut puntir dari perancangan bilah 3 dimensi nantinya. Untuk mendapatkan *twist optimum* maka menggunakan persamaan (10) sebagai berikut:

Diketahui: $y = -4,0964$

$x = 10,756$

$$\beta_0 = y \times r_0 + x = -4,0964 \times 0,170 + 10,756 = 10,06^\circ$$

$$\beta_1 = y \times r_1 + x = -4,0964 \times 0,253 + 10,756 = 9,72^\circ$$

$$\beta_2 = y \times r_2 + x = -4,0964 \times 0,336 + 10,756 = 9,38^\circ$$

$$\beta_3 = y \times r_3 + x = -4,0964 \times 0,419 + 10,756 = 9,04^\circ$$

$$\beta_4 = y \times r_4 + x = -4,0964 \times 0,502 + 10,756 = 8,70^\circ$$

$$\beta_5 = y \times r_5 + x = -4,0964 \times 0,585 + 10,756 = 8,36^\circ$$

$$\beta_6 = y \times r_6 + x = -4,0964 \times 0,668 + 10,756 = 8,02^\circ$$

$$\beta_7 = y \times r_7 + x = -4,0964 \times 0,752 + 10,756 = 7,68^\circ$$

$$\beta_8 = y \times r_8 + x = -4,0964 \times 0,834 + 10,756 = 7,34^\circ$$

$$\beta_9 = y \times r_9 + x = -4,0964 \times 0,917 + 10,756 = 7^\circ$$

$$\beta_{10} = y \times r_{10} + x = -4,0964 \times 1 + 10,756 = 6,66^\circ$$

Untuk melihat tabel perhitungan geometri bilah untuk mendapatkan nilai sudut puntir bilah menggunakan *software* Microsoft Excel 2016

Tabel 4.1.4 Hasil Perhitungan Geometri Bilah untuk Mendapatkan Nilai Sudut Puntir Bilah

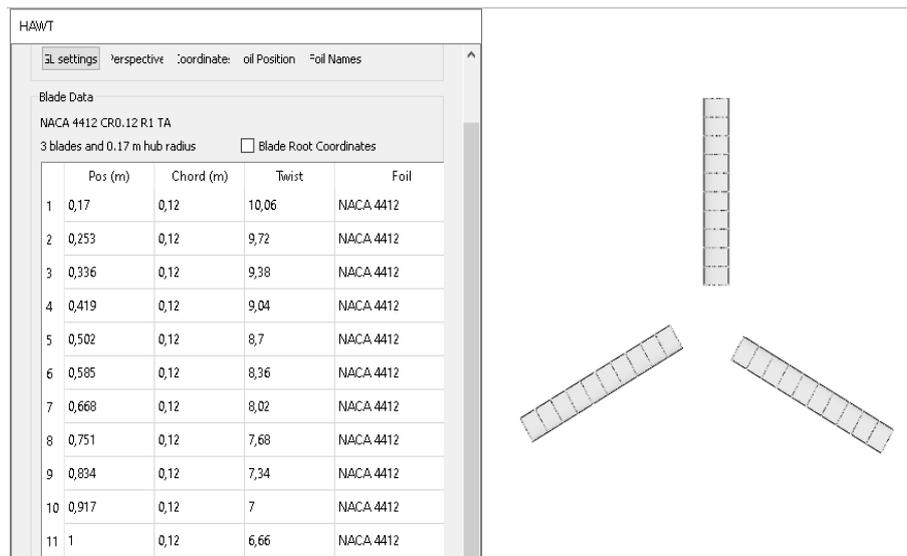
Elemen Bilah	Jari jari parsial	TSR Parsial	Coeffisient Lift	Alpha	Flow Angl e	Twist	Twis t Linea r 75%	Twist Optimum
			(CL)		(Deg)		(deg)	
n	r	λR		α	∅	B	β	β
0	0,170	1,19	1,86	15	26,69	11,69		10,06
1	0,253	1,77	1,25	7,32	19,63	12,31		9,72
2	0,336	2,35	0,94	4,24	15,36	11,12		9,38
3	0,419	2,93	0,76	2,57	12,55	9,98		9,04
4	0,502	3,51	0,63	1,4	10,59	9,19		8,70
5	0,585	4,10	0,54	0,64	9,15	8,51		8,36
6	0,668	4,68	0,47	-0,04	8,05	8,09		8,02
7	0,751	5,26	0,42	-0,5	7,18	7,68	7,68	7,68

8	0,83 4	5,84	0,38	-0,86	6,48	7,34	7,34	7,34
9	0,91 7	6,42	0,35	-1,13	5,90	7,03		7,00
10	1,00 0	7,00	0,32	-1,4	5,42	6,82		6,66

4.2. Simulasi dan Analisa Perhitungan Geometri Bilah

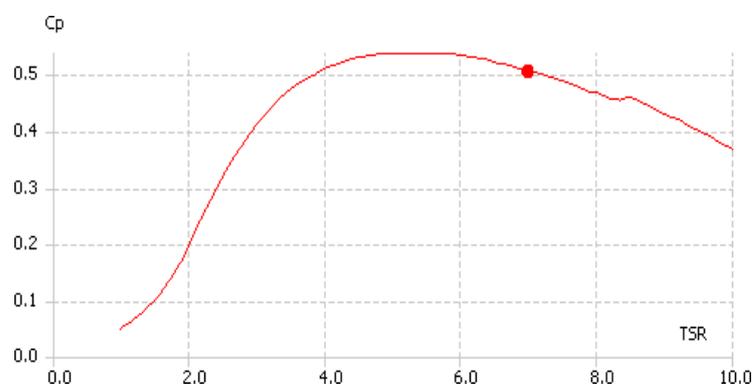
Adapun langkah-langkah simulasi dan analisa perhitungan geometri bilah adalah sebagai berikut:

- 1) Langkah pertama, mensimulasikan perhitungan geometri bilah dengan menggunakan *software* QBlade v0.963, dengan memasukkan angka-angka hasil perhitungan geometri bilah yang telah dibuat sebelumnya pada kolom yang berwarna abu-abu yang meliputi nilai jari-jari parsial, lebar bilah yang digunakan, sudut puntir yang digunakan, serta *airfoil* yang digunakan pada perancangan bilah ini yang ditunjukkan pada gambar (4.7).



Gambar 4.7 Simulasi perhitungan geometri bilah pada *software* QBlade v0.963

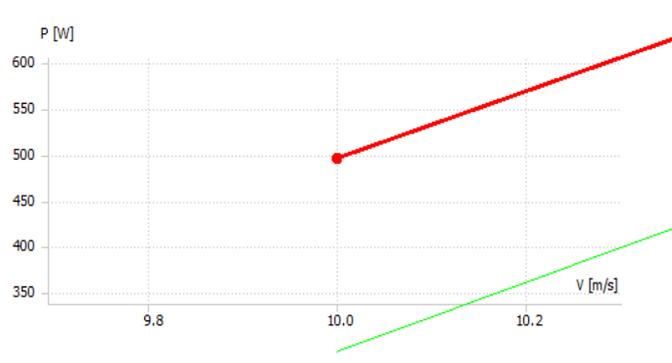
Langkah kedua, menganalisa data hasil perancangan bilah yang telah disimulasikan kedalam *software* QBlade v0.96. Hasil simulasi performa yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pada TSR 7 bilah yang dirancang memiliki nilai *coefficient performance* (C_p) maksimum sebesar 0,50 seperti yang ditunjukkan pada gambar (4.8).



Gambar 4.8 Grafik C_p -TSR

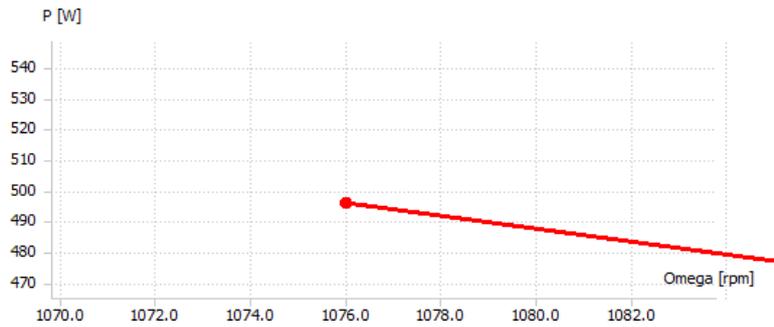
Menurut (Sandra Eriksson, 2008) turbin angin jenis HAWT memiliki *coefficient performance* (C_p) sebesar 40%-50%. Semakin tinggi efisiensi suatu turbin, Semakin maksimal pula turbin tersebut mengkonversi energi yang didapatnya. Sehingga untuk perancangan turbin angin ini dapat dikatakan sangat baik karena nilai dari *coefficient performance* (C_p) diperoleh sebesar 50%.

Langkah ketiga, mensimulasikan geometri bilah yang telah dibuat sebelumnya dengan metode *Blade Element Momentum* (BEM) menggunakan *software* QBlade v0.963. Simulasi bentuk geometri bilah ini dilakukan untuk melihat grafik pengaruh kecepatan angin terhadap daya yang dihasilkan (W) terhadap kecepatan putar bilah (Rpm), dan besar torsi (T) terhadap kecepatan putar bilah (Rpm). Berdasarkan hasil analisa bentuk geometri bilah tipe *taperless* yang disimulasikan dengan metode BEM (*Blade Element Momentum*) pada kecepatan angin maksimum sebesar 10 m/s dapat menghasilkan daya sebesar 500 watt. Sehingga perancangan bilah ini sesuai dengan perancangan yang diharapkan dengan yaitu menghasilkan daya sebesar 500 watt, yang ditunjukkan pada gambar (4.9) dibawah ini.



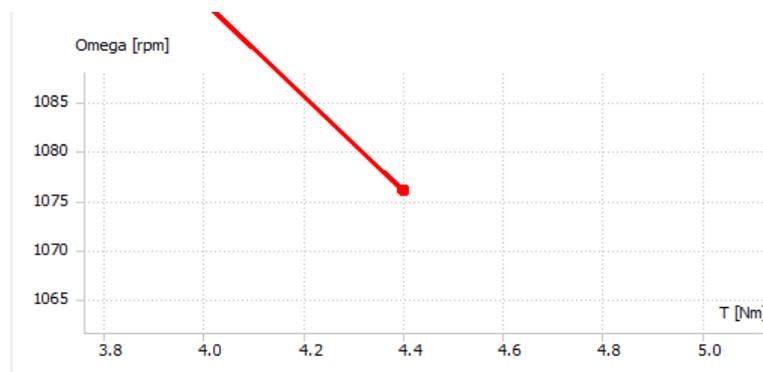
Gambar 4.9 Grafik kecepatan angin terhadap daya yang dihasilkan (P-V)

Berdasarkan hasil analisa bentuk geometri bilah tipe *taperless* yang disimulasikan dengan metode BEM (*Blade Element Momentum*) untuk menghasilkan daya 500 watt diperlukan kecepatan putar bilah sebesar 1076 Rpm, yang ditunjukkan pada gambar (4.10) dibawah ini.



Gambar 4.10 Grafik daya yang dihasilkan terhadap kecepatan putar bilah (P-Rpm)

Berdasarkan hasil analisa bentuk geometri bilah tipe *taperless* yang disimulasikan dengan metode BEM (*Blade Element Momentum*) bahwa dengan kecepatan putar bilah 1076 Rpm akan menghasilkan torsi sebesar 4,4 Nm, yang ditunjukkan pada gambar (4.11) dibawah ini.



Gambar 4.11 Grafik torsi terhadap kecepatan putar bilah (Q-Rpm)

Berdasarkan hasil analisa bentuk geometri bilah tipe *taperless* yang disimulasikan dengan metode BEM (*Blade Element Momentum*). Dapat disimpulkan bahwa perancangan ini akan menghasilkan daya sebesar 500 watt yaitu pada kecepatan angin maksimum 10 m/s dengan kecepatan putar bilah 1076 Rpm dengan torsi yang dihasilkan sebesar 4,4 Nm.

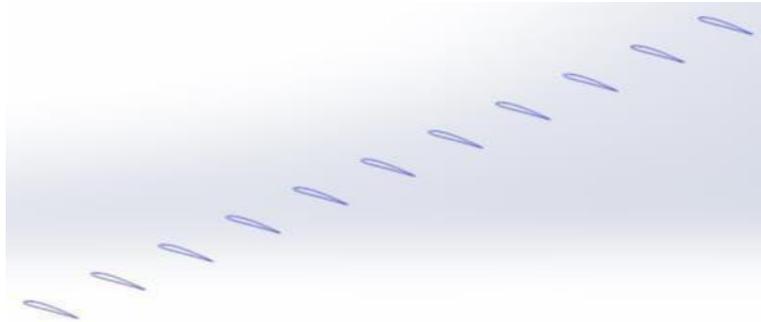
4.3. Mendapatkan Nilai Tebal Bilah dan Bentuk 3 Dimensi Bilah

Setelah selesai menentukan parameter perhitungan geometri bilah dan simulasi serta analisa data perancangan bilah, selanjutnya akan dilanjutkan dengan menggambar geometri bilah tipe *taperless* menggunakan *software* Solidwork 2016 untuk mendapatkan nilai tebal bilah dan bentuk 3 dimensi bilah dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Untuk memudahkan proses gambar 3 dimensi, maka perlu dicari koordinat bentuk *airfoil* NACA 4412 di tiap elemen. Data koordinat *airfoil* tiap

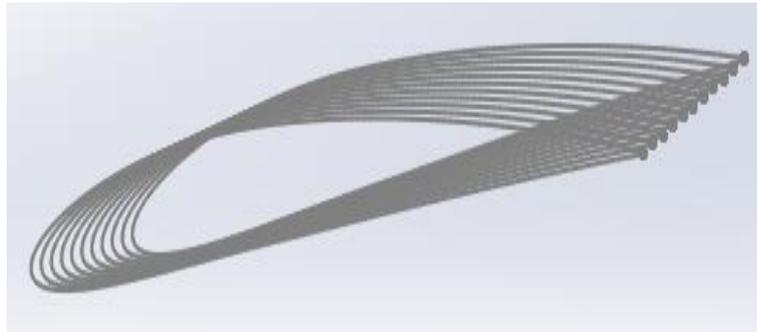
elemen tersebut diolah pada *software* Microsoft Excel 2016 kemudian diinput ke *software* Solidwork 2016. Koordinat *airfoil* NACA 4412 yang berasal dari *software* Qblade v0.963 adalah koordinat x dan y. Koordinat x dan y tersebut harus dikalikan dengan 100, karena proses desain solidworks lebih mudah menggunakan satuan milimeter, dan perlu ditambahkan koordinat z. Tuliskan nilai 0 untuk koordinat sumbu z, nilai 0 menunjukkan bahwa elemen ini berada pada posisi 0 mm. Untuk koordinat z elemen selanjutnya yaitu elemen 1 sampai 10 harus dilakukan pembagian jarak antar elemen yaitu koordinat z elemen 0 dikurangi dengan panjang bilah dari elemen 0 sampai elemen 10 kemudian dibagi dengan jumlah elemen yaitu 10 elemen yang terdiri dari elemen 1 sampai elemen 10, karena elemen 0 merupakan pangkal bilah. Sehingga didapatkan jarak antar elemen yaitu 83 mm.

- 2) Langkah berikutnya, data koordinat masing-masing elemen diinput dengan *toolbar curve (curve through xyz points)* yang terdapat pada *software Solidwork 2016* dan akan menghasilkan bentuk *airfoil*. Hasil input data koordinat ditunjukkan pada gambar (4.12) dibawah ini



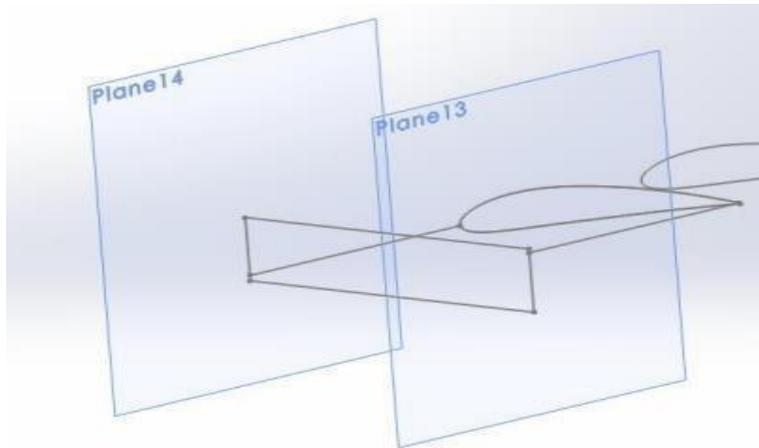
Gambar 4.12 Hasil input koordinat *airfoil* tiap elemen ke *software* Solidworks 2016

- 3) Langkah berikutnya, memasukkan angka untuk sudut puntir atau *twist* yang sebelumnya sudah dilinearisasi dan divariasi, dilanjutkan dengan memperbesar ukuran *airfoil* sesuai dengan skala yang telah ditentukan sebelumnya, seperti dilihat pada gambar (4.13) dibawah ini.



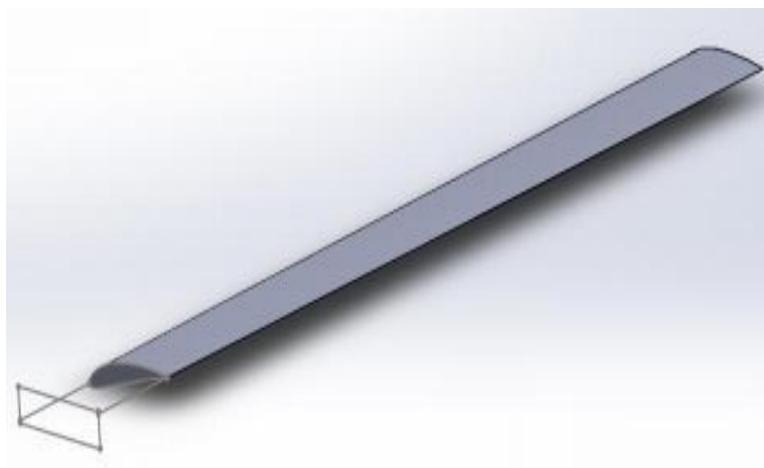
Gambar 4.13 *Airfoil* sesudah dimasukkan sudut puntir dan skala

- 4) Langkah berikutnya, melakukan pembuatan pangkal pada bilah untuk nantinya dipasangkan ke generator turbin angin seperti yang terlihat pada gambar (4.14) dibawah ini.



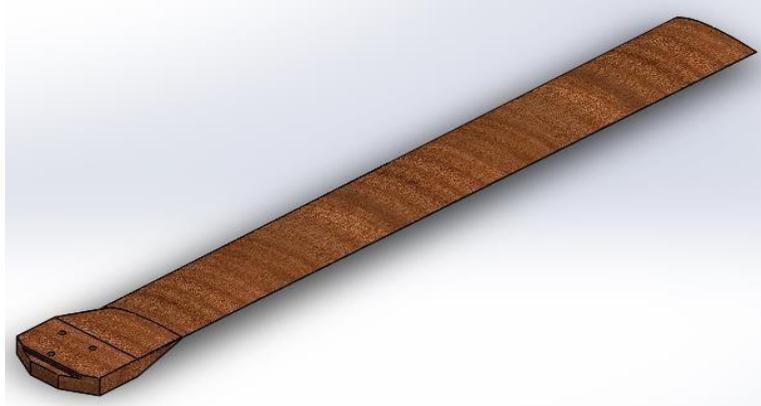
Gambar 4.14 Pembuatan pangkal bilah

- 5) Langkah selanjutnya, *extrude* pada *airfoil* sesudah dimasukkan sudut puntir dan skala seperti pada gambar (4.15) dibawah ini.



Gambar 4.15 *extrude* pada *airfoil* sesudah dimasukkan sudut puntir dan skala

- 6) Langkah selanjutnya, melakukan pengestrutan dan pembuatan lubang kedudukan pada pangkal bilah, sehingga terbentuklah gambar bilah 3 dimensi tipe *taperless* seperti gambar dibawah ini.



Gambar 4.16 Bilah tipe *taperless* 3 dimensi tampak isometric



Gambar 4.17 Bilah tipe *taperless* 3 dimensi tampak atas



Gambar 4.18 Bilah tipe *taperless* 3 dimensi tampak bawah



Gambar 4.19 Bilah tipe *taperless* 3 dimensi tampak kanan



Gambar 4.20 Bilah tipe *taperless* 3 dimensi tampak kiri



Gambar 4.21 Bilah tipe *taperless* 3 dimensi tampak depan



Gambar 4.22 Bilah tipe *taperless* 3 dimensi tampak belakang

- 7) Langkah terakhir, melakukan pengukuran pada pangkal bilah yang telah berbentuk 3 dimensi untuk mendapatkan nilai tebal bilah. Sehingga untuk tebal bilah dari perancangan bilah turbin pembangkit listrik tenaga angin jenis *taperless* untuk daya 500 watt sebesar 25,05 mm, seperti gambar (4.23) dibawah ini.



Gambar 4.23 Pengukuran pada pangkal bilah untuk menentukan tebal bilah

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil “perancangan bilah turbin pembangkit listrik tenaga angin jenis *taperless* untuk daya 500 watt” ini adalah:

- 1) Hasil perhitungan geometri bilah diperoleh panjang jari-jari bilah yang sebenarnya yaitu 1 m dengan lebar bilah (*chord*) sebesar 12 cm menggunakan tipe *airfoil* NACA 4412 dan sudut puntir (*twist optimum*) yang telah dilinearisasikan dengan tujuan mempermudah proses manufaktur bilah secara manual.
- 2) Hasil analisa perancangan geometri bilah tipe *taperless* yang disimulasikan dengan metode BEM (*Blade Element Momentum*) akan menghasilkan daya sebesar 500 watt yaitu pada kecepatan angin maksimum 10 m/s dengan kecepatan putar bilah 1076 Rpm dan torsi yang dihasilkan sebesar 4,4 Nm serta dengan nilai *coefficient performance* (C_p) maksimum sebesar 0,50 atau 50%. Karena menurut (Sandra Eriksson, 2008) turbin angin jenis HAWT memiliki *coefficient performance* (C_p) sebesar 40%-50%. Semakin tinggi efisiensi suatu turbin, Semakin maksimal pula turbin tersebut mengkonversi energi yang didapatnya. Sehingga untuk perancangan turbin angin ini dapat dikatakan sangat baik karena nilai dari *coefficient performance* (C_p) diperoleh sebesar 50%.
- 3) Untuk mengetahui geometri bilah hasil dari perancangan bilah tersebut di buat dalam bentuk gambar 3D dan gambar teknik lengkap dengan ukuran dan keterangan.

5.2. Saran

Perancangan yang telah dilakukan perlu dikembangkan lebih lanjut agar diperoleh hasil yang lebih baik. Adapun saran untuk mengembangkan dari perancangan ini adalah:

- 1) Analisis karakteristik *aerodinamika* pada bilah perlu dilakukan dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada *software* QBlade v0.963.

- 2) Analisis pemilihan jenis *airfoil* perlu melibatkan lebih banyak tipe *airfoil* seperti *airfoil* NACA seri 4 angka, 5 angka.
- 3) Diperlukan adanya analisis struktur kekuatan material menggunakan *software* Solidworks 2016 supaya bilah tersebut dapat terhindar dari terjadinya patah ketika digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik (BPS). 2017. “Kecepatan Angin dan Kelembaban di Stasiun Pengamatan BMKG 2011-2015”. <https://www.bps.go.id/statictable/2017/02/08/1960/kecepatan-angin-dan-kelembababn-di-stasiun-pengamatan-bmkg-2011-2015.html>. Diakses pada 23 September 2020.
- Blogspot.com. “*Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*”. Diakses pada 20 Agustus 2020, dari <http://2.bp.blogspot.com/-bofvEUHLDBc/VYaqFvWyz4I/AAAAAAAAAKbE/-OTzPXuvGik/s1600/Turbin%2BBayu%2BPertama%2BDibangun%2Bdi%2BBantul.jpg>.
- Darman, Lalu, Aria. 2020. “Rancang Bangun Bilah Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Angin Jenis *Taper* Untuk Skala Mikro”. Skripsi. FT, Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto, Yogyakarta.
- Dewita, A., dkk. 2015. “Pemanfaatan WRF-ARW Untuk Simulasi Potensi Angin Sebagai Sumber Energi di Teluk Bone”. <http://jurnal.unpad.ac.id/jmei/article/view/11160>. Diakses pada 23 September 2020.
- Eriksson, S., & Bernhoff, H. 2008. “*Evaluation of Different Turbine Concepts for Wind Power - Renewable and Sustainable Energy Reviews*”. <https://www.researchgate.net/publication/222433921-evaluation-of-different-turbine-concepts-for-wind-power>. Diakses pada 23 September 2020.
- Gootex.blogspot.com. “Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin”. Diakses pada 05 Januari 2021, dari <https://gootex.blogspot.com/2016/09/pembangkit-listrik-tenaga-angin-desain.html?m=1>.
- Janaloka.com. “Peta Potensi Energi Angin di Indonesia 2014”. Diakses pada 20 Oktober 2020, dari <https://janaloka.com/peta-potensi-energi-angin-di-indonesia/>.
- Lentera Angin Nusantara (LAN). 2012. Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin.

Lentera Angin Nusantara (LAN). 2014. Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin.

Nurdiana, Eka. 2019. “Indonesia Mandiri Energi Melalui Pemanfaatan Energi Domestik”.
<https://writing-contest.com/read/20191201/557/1176064/indonesia-mandiri-energi-melalui-pemanfaatan-energi-domestik.com>. Diakses pada 22 November 2020.

Nurhayati, A. S. 2019. “Sumber Energi Listrik Alternatif”.
<https://sumber.belajar.kemdikbud.go.id/repos/FileUpload/sumber%20energi%20tragedi%20Nasional/Topik-2.html>. Diakses pada 23 Desember 2020.

Piggott, H. 1997. “*Windpower Workshop Building Your Own Wind Turbine*”.
[file:///e:/module%20blade%20of%20wind%20turbine/hugh%20piggott%20-%20hal%201-62%20\(terjemahan\).pdf](file:///e:/module%20blade%20of%20wind%20turbine/hugh%20piggott%20-%20hal%201-62%20(terjemahan).pdf). Diakses pada 23 September 2020.

Setiawan, Ebta. 2019. “Arti Kata Angin - Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI) Online”.
<https://www.google.com/amp/s/kbbi.web.id/angin..html>. Diakses pada 23 September 2020.

Tokopedia.com. “*Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*”. Diakses pada 20 Desember 2020, dari
<https://m.tokopedia.com/gethukelektrik/kincir-angin-vertical-axis-wind-turbine-generator-12v-10w-max-15w-4bb7>.

Zahra, I. N. 2016. “Dasar-Dasar Perancangan Bilah”. Ciheras: Lentera Bumi Nusantara.

• LAMPIRAN I

