BAPPEDA

# LAPORAN

# DESAIN AWAL TURBIN ANGIN LEPAS PANTAI

# DI GAMPONG ALUE NAGA

**KERJASAMA**
**BADAN PERENCANAAN PEMBANGUNAN DAERAH**
**DENGAN**
**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**
**UNIVERSITAS ISLAM NEGERI (UIN) AR-RANIRY**
**TAHUN 2019**

*ISSN :*

**TIM PENYUSUN**

DESAIN AWAL TURBIN ANGIN LEPAS PANTAI DI GAMPONG ALUE NAGA KOTA BANDA ACEH

1. Ir. Gusmeri , MT
2. Dr. Azhar Amsal, S.Pd, M.Pd
3. Nila Herawati, SE, M.Si
4. Parmakope, SE, MM
5. Eriawati, S.Pd.I.M.Pd
6. Adian Aristia Anas, ST, M. Sc
7. Zainuddin, ST
8. Raihan Rani
9. Cut Ali Akbar

**Dilarang mengumumkan, mendistribusikan , mengkomunikasikan, dan/atau menggandakan sebagian atau seluruh isi buku ini untuk tujuan komersial tanpa izin tertulis dari Badan Perencanaan Pembangunan Daerah**

# ABSTRAK

Kebutuhan akan energi akan terus meningkat seiring dengan perkembangan penduduk serta ekonomi suatu daerah. Di Indonesia sendiri, penggunaan energi masih didominasi oleh energi fosil seperti minyak bumi, batubara, dan gas alam hingga hampir mencapai 90%. Konsumsi energi fosil yang semakin tinggi menyebabkan ketersediaannya menjadi berkurang sehingga dibutuhkan suatu bentuk energi alternatif yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Salah satu bentuk energi terbarukan yang gencar dikembangkan yaitu energi angin dengan menggunakan turbin angin sebagai instalasi pembangkit energi listrik dari tenaga angin. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat sebuah desain awal turbin angin horizontal di Alue Naga, Kota Banda Aceh dengan kapasitas daya 1 kW dan mensimulasikannya dengan menggunakan perangkat lunak *Q-Blade*. Penelitian ini menggunakan metode observasi melalui pengukuran kecepatan angin di pesisir Gampong Alue Naga dan kemudian mensimulasikan kecepatan angin tersebut dengan bentuk geometri *airfoil* NREL S816 menggunakan perangkat lunak *Q-Blade* dengan radius *rotor* 2 m yang akan dikonversi menjadi energi listrik. Turbin angin Alue Naga didesain dengan kapastitas daya awal sebesar 1000 Watt, diameter *rotor* 4m, putaran *rotor* 169 RPM dengan daya *output* 590 Watt pada kecepatan angin rata-rata yang dihasilkan oleh generator Ginlong 1 kW GL-PMG-1000, dan menara tubular setinggi 10m. Hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak *Q-Blade* menunjukkan bahwa rancangan rotor turbin angin mampu menghasilkan daya (*output power*) maksimum sebesar 940 Watt pada kecepatan angin 8 m/s sedangkan daya yang dihasilkan pada kecepatan angin rata-rata sebesar 6,1 m/s adalah sebesar 610 Watt.

Kata kunci: turbin angin, Alue Naga, kecepatan angin, *airfoil* NREL S816, *Q-Blade*, daya.

# KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur disampaikan kehadirat Allah SWT dengan rahmat dan karunia-Nya karya ilmiah ini dapat terselesaikan dengan baik. Shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan sahabatnya yang telah menjadi tauladan bagi sekalian manusia dan alam semesta.

Kami berharap laporan survey "DESAIN AWAL TURBIN ANGIN LEPAS PANTAI DI GAMPONG ALUE NAGA" dapat bermanfaat bagi semua pihak terkait, khususnya dalam pelaksanaan perencanaan program kegiatan pembangunan di Kota Banda Aceh.

Penyusun menyadari bahwa masih terdapat kekurangan maupun mungkin kesalahan dalam penyusunan laporan ini sehingga penyusun mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk perbaikan dimasa yang akan datang dari seluruh pembaca.

Banda Aceh,  November 2019

Tim Penyusun

# DAFTAR ISI

**ABSTRAK** ..... **i**
**KATA PENGANTAR** ..... **ii**
**DAFTAR ISI** ..... **iv**
**DAFTAR GAMBAR** ..... **vi**
**DAFTAR TABEL** ..... **viii**
**DAFTAR LAMPIRAN** ..... **ix**
**BAB I PENDAHULUAN**
1.1. Latar Belakang ..... 1
1.2. Rumusan Masalah ..... 6
1.3. Tujuan Penelitian ..... 6
1.4. Manfaat Penelitian ..... 6
1.5. Batasan Penelitian ..... 7

**BAB II TINJAUAN PUSTAKA**
2.1. Energi Angin ..... 6
2.2. Turbin Angin ..... 9
2.2.1. Turbin Angin Sumbu Vetikal ..... 10
2.2.2. Turbin Angin Sumbu Horizontal ..... 12
2.3. Elemen pada Turbin Angin ..... 14
2.3.1. Sudu Turbin (*Blade*) ..... 14
2.3.2. *Hub* ..... 16
2.3.3. Generator ..... 17
2.3.4. Ekor ..... 18
2.3.5. Mekanisme *Yawing* dan *Furling* ..... 19
2.3.6. Menara ..... 20
2.3.7. Sistem Kontrol ..... 22
2.3.8. Penyimpanan Daya ..... 22
2.4. Simulasi Sudu Turbin Menggunakan Aplikasi *Q-Blade* ..... 23

**BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

3.1. Metode Penelitian ..... 25
3.2. Waktu dan Lokasi Penelitian ..... 25
3.3. Alat dan Bahan ..... 26
3.4. Tahap Penelitian ..... 28
3.4.1. Tahap Persiapan ..... 27
3.4.2. Data Penelitian ..... 28
3.5. Desain Sudu *Rotor* Menggunakan Perangkat Lunak *Q-Blade* ..... 28
3.6. Jadwal Pelaksanaan Penelitian ..... 32

**BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1. Kecepatan Angin di Pesisir Gampong Alue Naga ..... 33
4.2. Desain Turbin Angin ..... 37
4.2.1. Sudu Turbin (*Blade*) ..... 37
4.2.2. *Hub* ..... 41
4.2.3. Generator ..... 42
4.2.4. Ekor ..... 43
4.2.5. Mekanisme *Yawing* dan *Furling* ..... 45
4.2.6. Menara ..... 46
4.2.7. Sistem Kontrol ..... 51
4.2.8. Penyimpanan Daya ..... 53

**BAB V PENUTUP**

5.1. Kesimpulan ..... 57
5.2. Saran ..... 57

**DAFTAR PUSTAKA ..... 58**

**LAMPIRAN**

Lampiran A ..... 61
Lampiran B ..... 63

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Sasaran Bauran Energi Primer Nasional pada Tahun 2025 ..... 2
Gambar 2.1. Tipe turbin angin sumbu vertikal ..... 11
Gambar 2.2. Koefisien daya ($C_p$) versus *tip speed ratio* untuk berbagai tipe turbin angin ..... 11
Gambar 2.3. Turbin angin sumbu horizontal ..... 12
Gambar 2.4. Tipe turbin angin sumbu horizotal ..... 13
Gambar 2.5. Ilustrasi penampakan aliran udara yang melalui suatu *airfoil*..... 15
Gambar 2.6. Contoh bentuk ekor pada turbin angin ..... 19
Gambar 2.7. Mekanisme *furling*: (a) pada kondisi angin dengan kecepatan normal; (b) pada kondisi angin dengan kecepatan sedang; dan (c) pada kondisi angin dengan kecepatan tinggi..... 20
Gambar 2.8. Jenis-jenis menara ..... 21
Gambar 3.1. Peta lokasi pengukuran kecepatan angin di pesisir Gampong Alue Naga, Kota Banda Aceh ..... 25
Gambar 3.2. Kondisi titik lokasi pengambilan sampel kecepatan angin di pesisir Gampong Alue Naga, Kota Banda Aceh..... 26
Gambar 3.3. Anemometer Lutron AM-4222 sebagai alat pengambilan sampel kecepatan angin di pesisir Gampong Alue Naga, Kota Banda Aceh ..... 27
Gambar 4.1. Statistik kecepatan angin rata-rata selama 30 hari di pesisir Gampong Alue Naga..... 36
Gambar 4.2. Bentuk penampang *airfoil* NREL S816 ..... 37
Gambar 4.3. Model sudu turbin angin dengan menggunakan *airfoil* NREL S816 hasil dari desain pada software *Q-Blade*..... 38
Gambar 4.4. Koefisien daya ($C_p$ ) versus *Tip Speed Ratio* (λ) pada turbin angin dengan *airfoil* NREL S816 di pesisir Gampong Alue Naga ... 39
Gambar 4.5. Daya (*P*) versus kecepatan angin (*U*) sudu turbin angin dengan *airfoil* NREL S816 di pesisir Gampong Alue Naga..... 40
Gambar 4.6. Rincian desain *hub* ..... 42

Gambar 4.7. Bentuk dan gambar desain generator GMP 1 kW GL-PMG-1000 yang diproduksi oleh Ginlong, Tiongkok ..... 43
Gambar 4.8. Rincian desain daun ekor ..... 44
Gambar 4.9. Contoh desain ekor turbin menggunakan *software SolidWork* ..... 44
Gambar 4.10. Mekanisme *yawing* dan *furling* turbin angin pada kondisi operasi normal ..... 45
Gambar 4.11. Mekanisme *yawing* dan *furling* turbin angin pada kondisi angin kecepatan tinggi ..... 46
Gambar 4.12. Rincian desain menara ..... 48
Gambar 4.13. Rincian desain poros atas menara ..... 48
Gambar 4.14. Rincian desain dasar sumbu letakan menara ..... 49
Gambar 4.15. Rincian desain pin dasar sumbu letakan menara ..... 49
Gambar 4.16. Rincian desain tiang letakan menara ..... 50
Gambar 4.17. Penurunan menara selama angin berkecepatan tinggi ..... 51
Gambar 4.18. *Three phase bridge rectifier* untuk mengubah arus AC menjadi arus DC pada turbin angin ..... 52
Gambar 4.19. Digital voltage sensing relay 10A ..... 53
Gambar 4.20. *Koyama deep cycle battery* DC100-12 dengan spesifikasi 12V 100Ah ..... 54
Gambar 4.21. Komponen desain sistem pada turbin angin di Alue Naga, Kota Banda Aceh ..... 55

# DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Tingkat kecepatan angin menurut Beaufort ..... 7
Tabel 2.1. Pengelompokan skala terhadap potensi energi angin ..... 9
Tabel 3.1. Jadwal pelaksanaan penelitian ..... 32
Tabel 4.1. Data hasil pengukuran kecepatan angin di pesisir Gampong Alue Naga ..... 33
Tabel 4.2. Spesifikasi rancangan sudu turbin angin Alue Naga ..... 38
Tabel 4.3. Spesifikasi desain turbin angin Alue Naga, Kota Banda Aceh..... 55

# DAFTAR LAMPIRAN

**Lampiran A – Data Generator GMP Ginlong**

Gambar A.1. Spesifikasi generator Ginlong kapasitas 1000 W tipe 1 kW GL-PMG-1000 ..... 61

Gambar A.2. Rincian pemasangan generator Ginlong kapasitas 1000 W tipe 1 kW GL-PMG-1000 ..... 62

Gambar A.3. Rician poros generator Ginlong kapasitas 1000 W tipe 1 kW GL-PMG-1000 ..... 62

**Lampiran B – Sifat elastisitas Bahan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP)**

Gambar B.1. Modulus longitudinal $E_x$ (MPa), rasio Poisson $\upsilon_{xy}$, dan koefisien ekspansi termal $\alpha_x$, sebagai fungsi dari persentase lapisan dalam arah 0°, 90°, +45° dan -45° ..... 63

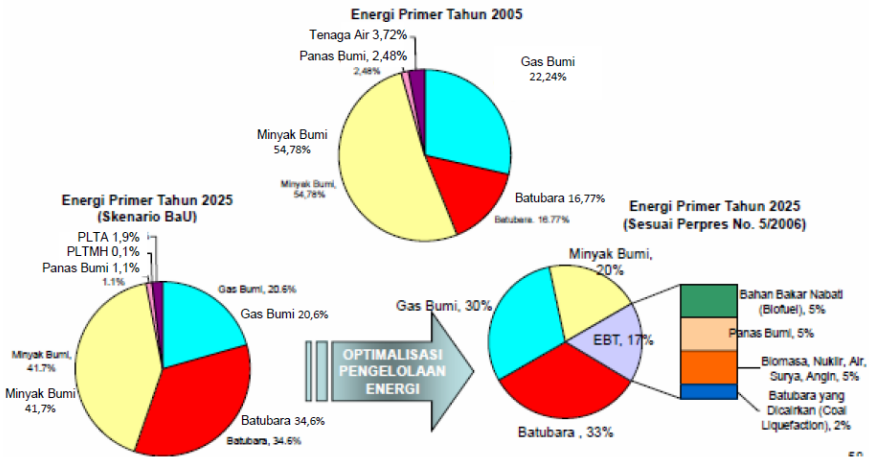
Gambar B.2. Modulus geser, Gxy (MPa) sebagai fungsi lapisan persentase dalam arah 0°, 90°, +45° dan -45° ..... 64

# BAB I
# PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Kebutuhan akan energi akan terus meningkat seiring dengan perkembangan penduduk serta ekonomi suatu daerah. Di Indonesia sendiri, penggunaan energi masih didominasi oleh energi fosil seperti minyak bumi, batubara, dan gas alam hingga hampir mencapai 90% (Jaelani, 2017). Konsumsi energi fosil yang semakin tinggi menyebabkan ketersediaannya menjadi berkurang sehingga mengharuskan Indonesia untuk melakukan impor sumber energi dari luar negeri, terutama untuk pasokan minyak mentah. Padahal ketersediaan potensi akan energi terbarukan di Indonesia sebagai sumber energi alternatif juga cukup berlimpah namun eksplorasi dan pemanfaatan yang dilakukan masih minim dan perlu dilakukan banyak pengembangan (Elinur, Priyarsono, Tambunan, & Firdaus, 2010).

Energi terbarukan merupakan bentuk energi bersih yang dapat diperoleh dari proses alam yang berkelanjutan di antaranya yaitu energi dari sinar matahari, air, angin, gelombang laut, panas bumi, pasang surut air laut, biomassa, biofuel, dan bahkan dari hujan sekalipun yang penggunaannya tidak akan menyebabkan pencemaran lingkungan dan energinya dapat dimanfaatkan secara terus menerus. Pemanfaatan energi terbarukan sedang marak-maraknya dilakukan oleh pemerintah. Hal ini bertujuan untuk mencapai target yang telah ditetapkan dalam *Blue Print* Pengelolaan Energi Nasional 2006-2025 yaitu sebuah kebijakan energi nasional dalam rangka mengurangi ketergantungan pemakaian energi fosil berupa minyak dan gas alam dengan meningkatkan pangsa energi terbarukan dari 4% pada tahun 2006 menjadi 17% pada tahun 2025 yang berasal dari biofuel sebesar 5%, energi panas bumi sebesar 5%, energi dari batubara tercairkan sebesar 2%, dan energi baru-terbarukan lainnya seperti biomassa, nuklir, surya, angin, dan air sebesar 5%. Untuk lebih rincinya akan disajikan dalam diagram berikut ini.




**Gambar 1.1.** Sasaran Bauran Energi Primer Nasional pada Tahun 2025.
(*Sumber: Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2006-2025*)

Sifat energi terbarukan yang ramah lingkungan tidak menimbulkan dampak negatif pada penggunaannya seperti pencemaran lingkungan. Hal ini menjadi solusi dari permasalahan yang selama ini diperoleh dari penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi yang umum digunakan dan banyak menghasilkan gas buang bersama berbagai partikulat yang dapat mencemari udara dan menyebabkan hujan asam (Astra, 2010). Selain itu juga menghasilkan emisi gas rumah kaca, salah satunya yaitu gas karbon dioksida ($CO_2$). Penggunaan energi fosil yang terus meningkat dari waktu ke waktu juga akan semakin menyebabkan peningkatan emisi karbon dan gas rumah kaca lainnya. Gas rumah kaca ini nantinya akan menyebabkan efek rumah kaca yang menjadi salah satu penyebab pemanasan global dan berlanjut menyebabkan perubahan iklim yang tentunya berdampak sangat tidak baik bagi makhluk hidup dan lingkungan.

Salah satu bentuk energi terbarukan yang sedang dikembangkan di dunia saat ini adalah energi angin. Energi angin dapat dimanfaatkan untuk beragam keperluan baik dalam bidang pertanian, perikanan, hingga untuk membangkitkan tenaga listrik (Daryanto, 2007). Sebagai negara kepulauan dan memiliki garis pantai yang panjang serta letaknya yang berada pada garis khatulistiwa, Indonesia memiliki potensi energi angin yang besar namun pemanfaatannya masih sangat kecil. Indonesia mempunyai kecepatan angin rata-rata sebesar 3,5 sampai 7 m/s

(Hafiz, 2013). Berdasarkan data dari Ditjen Ketenagalistrikan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2017), Indonesia mampu membangkitkan daya listrik lebih kurang hingga mencapai 60,6 GW, sedangkan kapasitas terpasang baru sekitar 1,1 MW daya listrik dari potensi energi angin yang baru termanfaatkan. Oleh karena itu, diharapkan potensi energi angin tersebut dapat dijadikan sebagai salah satu bentuk energi alternatif untuk menggantikan energi fosil terutama dalam kegiatan pembangkitan energi listrik yang menggunakan minyak dan batubara. Untuk wilayah Aceh sendiri, potensi energi angin yang dimiliki dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan energi listrik. Aceh memiliki potensi energi angin dengan kecepatan rata-rata angin tahunan mencapai 5,12 m/s dimana untuk menggerakkan sebuah turbin diperlukan angin dengan kecepatan dasar berkisar antara 3 sampai 4 m/s (Indonesia Environment & Energy Center).

Salah satu kawasan yang memiliki potensi energi angin yang besar di daerah Aceh terdapat pada kawasan pesisir Kota Banda Aceh yaitu sekitar pantai Ulee Lheue dan wilayah sekitarnya seperti Peukan Bada dan Krueng Raya yang terletak pada kabupaten Aceh Besar. Kawasan tersebut mempunyai kecepatan angin hingga 5,2 sampai 6,6 m/s sehingga sangat potensial untuk dibangun pembangkit listrik dengan memanfaatkan energi angin/bayu (http://aplikasi.ebtke.esdm.go.id/). Selain itu, Muhammad Hafiz (2013) dalam penelitiannya mendapatkan bahwa di kawasan pesisir pantai Gampong Alue Naga mempunyai potensi energi angin dengan kecepatan angin terbesar yaitu 3,7 m/s yang terjadi pada pukul 16.00 sampai 17.00 WIB. Walaupun kecepatan angin tersebut tergolong rendah, namun dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin angin untuk menghasilkan energi listrik.

Energi angin dimanfaatkan dengan menggunakan alat konversi berupa kincir atau turbin angin. Energi kinetik dari angin ditangkap oleh sudu – sudu dengan luasan tertentu sehingga terjadi putaran (RPM) pada sudu, yang dikonversikan menjadi energi listrik dengan putaran generator. Berdasarkan perihal tersebut maka dalam penelitian ini akan dibuat sebuah desain awal dari turbin angin untuk sekiranya dapat memanfaatkan potensi angin yang ada di Pesisir Alue Naga, Kota Banda Aceh.

## 1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana kriteria desain awal turbin angin horizontal lepas pantai di Alue Naga, Kota Banda Aceh?
2. Bagaimana hasil simulasi rancangan rotor turbin angin horizontal lepas pantai di Alue Naga, Kota Banda Aceh dengan menggunakan perangkat lunak *Q-Blade*?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menjelaskan kriteria desain awal turbin angin horizontal lepas pantai di Alue Naga, Kota Banda Aceh.
2. Menjelaskan hasil simulasi rancangan rotor turbin angin horizontal lepas pantai di Alue Naga, Kota Banda Aceh dengan menggunakan perangkat lunak *Q-Blade*.

## 1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini diharapkan mampu membuat masyarakat Kota Banda Aceh agar dapat memanfaatkan energi angin sebagai sumber energi listrik.
2. Ditemukannya cara yang efektif dan efisien dalam konfigurasi turbin untuk dapat membangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Gampong Alue Naga, kota Banda Aceh, sebagai penyuplai daya Kota Banda Aceh.
3. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan acuan penyedia energi listrik terbarukan yang ramah lingkungan.
4. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan acuan pembangunan *prototype* turbin angin di Gampong Alue Naga, Kota Banda Aceh.

## 1.5. Batasan Penelitian

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Turbin yang akan dirancang hanya meliputi desain awal turbin angin berskala kecil.
2. Data pengukuran kecepatan angin hanya dilakukan selama 30 hari pada ketinggian 2 m.
3. Desain awal turbin hanya terfokus pada bagian *airfoil* dan *blade* sedangkan bagian lainnya akan disesuaikan dengan bahan yang sudah umum dipakai pada PLTB turbin angin.
4. Desain turbin belum mencakup rancangan konstruksi pada bagian *floating*, yaitu struktur pengapung turbin pada air.

# BAB II
# TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1. Energi Angin

Angin merupakan suatu fenomena alam yang terjadi karena adanya perbedaan suhu dan tekanan udara pada beberapa daerah. Udara akan bergerak dari daerah bertekanan tinggi ke daerah lain yang tekanannya lebih rendah, atau dari daerah yang bersuhu lebih rendah ke daerah lain yang suhunya lebih tinggi. Ketika suhu udara di kawasan khatulistiwa meningkat akibat paparan sinar matahari, maka udara akan memuai dan menjadi ringan sehingga udara akan bergerak naik ke atas kemudian bergerak 30 atau 60 derajat ke arah yang lebih dingin seperti wilayah kutub. Udara hangat yang naik ke atas menyebabkan kekosongan ruang yang sebelumnya terisi oleh udara yang telah naik sehingga menyebabkan tekanan udara menurun. Udara yang lebih dingin di daerah lain mempunyai tekanan udara yang lebih besar bila dibandingkan dengan udara hangat dan akan bergerak ke daerah dengan suhu udara lebih hangat sehingga terjadilah perputaran udara yang kita kenal sebagai angin (Wiranti, 2012).

Kecepatan aliran angin dipengaruhi oleh beberapa faktor dimana dua diantaranya telah disebutkan sebelumnya yaitu perbedaan temperatur dan tekanan udara. Selain itu, ketinggian suatu daerah juga memengaruhi kecepatan angin yang berhembus di daerah tersebut. Semakin tinggi suatu kawasan, maka angin yang bertiup akan lebih kencang dan stabil dikarenakan berkurangnya hambatan yang dilalui angin ketika berhembus. Faktor selanjutnya yaitu letak lintang yang berkaitan dengan posisi matahari. Daerah khatulistiwa yang merupakan daerah lintang rendah akan mengalami angin yang lebih kencang. Hal ini disebabkan oleh tingginya intensitas paparan sinar matahari pada daerah tersebut sehingga bersuhu lebih panas dari pada daerah lintang tinggi yang berupa daerah kutub. Perbedaan panas inilah yang menghasilkan sumber angin utama di Bumi (Widyanto, Wisnugroho, & Agus, 2018).

Kecepatan angin dapat diukur salah satunya yaitu dengan menggunakan anemometer. Selanjutnya, kecepatan angin tersebut dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok seperti yang sudah dilakukan oleh Beaufort sebagai berikut.

**Tabel 2.1.** Tingkat kecepatan angin menurut Beaufort

| **Skala Beaufort** | **Kategori** | **Satuan dalam Km/jam** | **Satuan dalam Knots** | **Keadaan di Daratan** | **Keadaan di Lautan** |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | Udara Tenang | 0 | 0 | Asap bergerak secara vertikal | Permukaan laut seperti kaca |
| 1-3 | Angin lemah | ≤ 19 | ≤ 10 | Angin terasa di wajah, daun-daun berdesir, kincir angin bergerak oleh angin | Riuk kecil terbentuk namun tidak pecah, permukaan tetap seperti kaca |
| 4 | Angin sedang | 20-29 | 11-19 | Debu terangkat dan kertas dapat terbang, cabang pohon kecil bergerak | Ombak kecil mulai memanjang, garis-garis buih sering terbentuk |
| 5 | Angin segar | 30-39 | 17-21 | Pohon kecil berayun, gelombang kecil terbentuk di perairan | Ombak ukuran sedang, buih berarak-arak |
| 6 | Angin kuat | 40-50 | 22-27 | Cabang besar bergerak, siulan terdengar pada kabel telepon, payung sulit digunakan | Ombak besar mulai terbentuk, buih tipis melebar dari puncak nya, kadang-kadang timbul percikan |
| 7 | Angin ribut | 51-62 | 28-33 | Pohon-pohon bergerak, terasa sulit berjalan melawan arah angin | Laut mulai bergolak, buih putih mulai terbawa angin dan membentuk alur-alur sesuai arah angin |
| 8 | Angin ribut sedang | 63-75 | 34-40 | Ranting-ranting patah, semakin sulit bergerak | Gelombang agak tinggi dan lebih panjang, puncak gelombang yang panjang mulai bergulung, buih yang terbesar anginnya semakin jelas alur-alurnya |
| 9 | Angin ribut kuat | 76-87 | 41-47 | Kerusakan angunan mulai terjadi, atap rumah lepas, cabang yang lebih besar patah | Gelombang tinggi terbentuk bulu tebal berlajur-lajur, puncak gelombang roboh bergulung-gulung, percik-percik air mulai |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | mengganggu penglihatan |
| 10 | Badai | 88-102 | 48-55 | Jarang terjadi di daratan, pohon-pohon tercabut, kerusakan bangunan yang cukup parah | Gelombang sangat tinggi degan puncak memayungi, buih yang ditimbulkan membentuk tampal-tampal buih raksasa yang didorong angin, seluruh permukaan laut memutih, gulungan ombak menjadi dasyat, penglihatan terganggu |
| 11 | Badai kuat | 103-117 | 56-63 | Sangat jarang terjadi, kerusakan menyebar secara luas | Gelombang amat sangat tinggi (kapal-kapal kecil dan sedang terganggu pandangan karenannya). Permukaan laut tertutup penuh tampal-tampal putih buih karena seluruh puncak gelombang menghamburkan buih yang terdorong angin, penglihatan terganggu |
| 12+ | Badai topan | [3]118 | [3]64 | | Udara tertutup penuh oleh buih dan percik air, permukaan laut memuruh penuh oleh percik-percik air yang terhanyut angin, penglihatan amat sangat terganggu |

*Sumber: <my.belajar.kemdikbud.go.id>*

Energi angin merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang memiliki potensi untuk dijadikan sebagai energi alternatif dalam rangka penyediaan energi listrik nasional. Sebagai negara kepulauan dan memiliki garis pantai yang panjang serta terletak pada daerah khatulistiwa, Indonesia memiliki potensi energi angin yang besar namun pemanfaatannya masih sangat kecil. Indonesia mempunyai

kecepatan angin rata-rata sebesar 3,5 sampai 7 m/s (Hafiz, 2013). Untuk wilayah Aceh sendiri, potensi energi angin yang dimiliki dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan energi listrik. Aceh memiliki potensi energi angin dengan kecepatan rata-rata angin tahunan mencapai 5,12 m/s dimana untuk menggerakkan sebuah turbin diperlukan angin dengan kecepatan dasar berkisar antara 3 sampai 4 m/s (Indonesia Environment & Energy Center).

Salah satu kawasan yang memiliki potensi energi angin yang besar di daerah Aceh terdapat pada kawasan pesisir Kota Banda Aceh yaitu sekitar pantai Ulee Lheue dan wilayah sekitarnya seperti Peukan Bada dan Krueng Raya yang terletak pada kabupaten Aceh Besar. Kawasan tersebut mempunyai kecepatan angin hingga 5,2 sampai 6,6 m/s sehingga sangat potensial untuk dibangun pembangkit listrik dengan memanfaatkan energi angin/bayu (http://aplikasi.ebtke.esdm.go.id/). Selain itu, Muhammad Hafiz (2013) dalam penelitiannya mendapatkan bahwa di kawasan pesisir pantai Gampong Alue Naga mempunyai potensi energi angin dengan kecepatan angin terbesar yaitu 3,7 m/s yang terjadi pada pukul 16.00 sampai 17.00 WIB. Walaupun kecepatan angin tersebut tergolong rendah, namun dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin angin untuk menghasilkan energi listrik. Potensi energi angin dapat dikelompokkan ke dalam tiga kelompok skala kecepatan angin dan daya yang dapat dihasilkan.

**Tabel 2.2.** Pengelompokan skala terhadap potensi energi angin

| **Skala** | **Kecepatan Angin (m/s)** | **Daya Spesifik (W/m2)** | **Kapasitas (kW)** |
|---|---|---|---|
| Kecil | 2,5 – 4,0 | < 75 | s.d. 10 |
| Menengah | 4,0 – 5,0 | 75 – 150 | 10 – 100 |
| Besar | > 5,0 | > 150 | > 100 |

*Sumber: Hafiz, 2013.*

## 2.2. Turbin Angin

Turbin angin merupakan sebuah instalasi yang dapat membangkitkan energi listrik dengan angin sebagai sumber penggeraknya. Energi kinetik yang berasal dari angin akan dikonversi ke dalam bentuk energi listrik dengan melalui dua tahap, yaitu: 1) energi kinetik dari tiupan angin akan menggerakkan *rotor* turbin

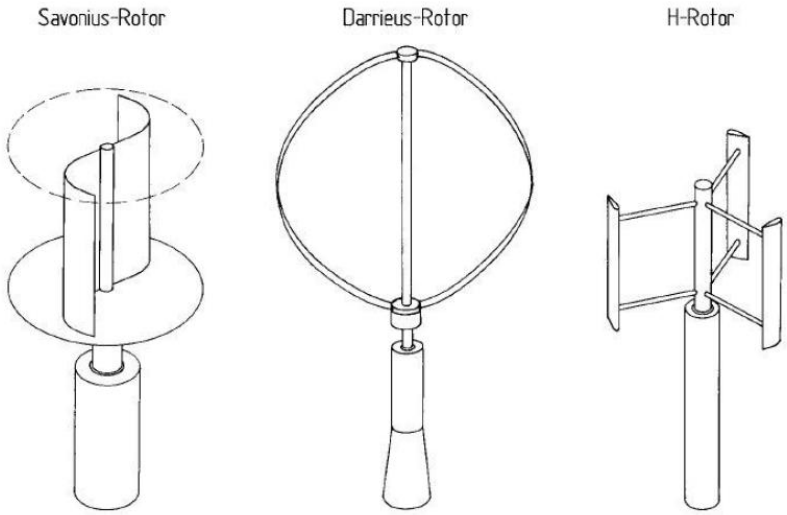
angin sehingga *rotor* berputar; dan 2) energi mekanik dari putaran *rotor* akan menggerakkan *rotor* pada generator yang berada di belakangnya sehingga energi mekanik tersebut akan dikonversikan menjadi energi listrik yang akan ditransmisikan pada jaringan listrik terdekat ataupun disimpan di dalam baterai.

Berdasarkan arah sumbu putarnya, turbin angin terbagi menjadi dua tipe, yaitu turbin angin sumbu vertikal dan turbin angin sumbu horizontal. Turbin angin sumbu vertikal mempunyai sumbu putar yang arahnya tegak lurus dengan arah datangnya angin. Sementara turbin angin sumbu horizontal memiliki sumbu putar yang searah dengan arah datangnya angin. Kedua tipe turbin ini mempunyai karakteristik masing-masing yang berbeda (Saputra, 2016).

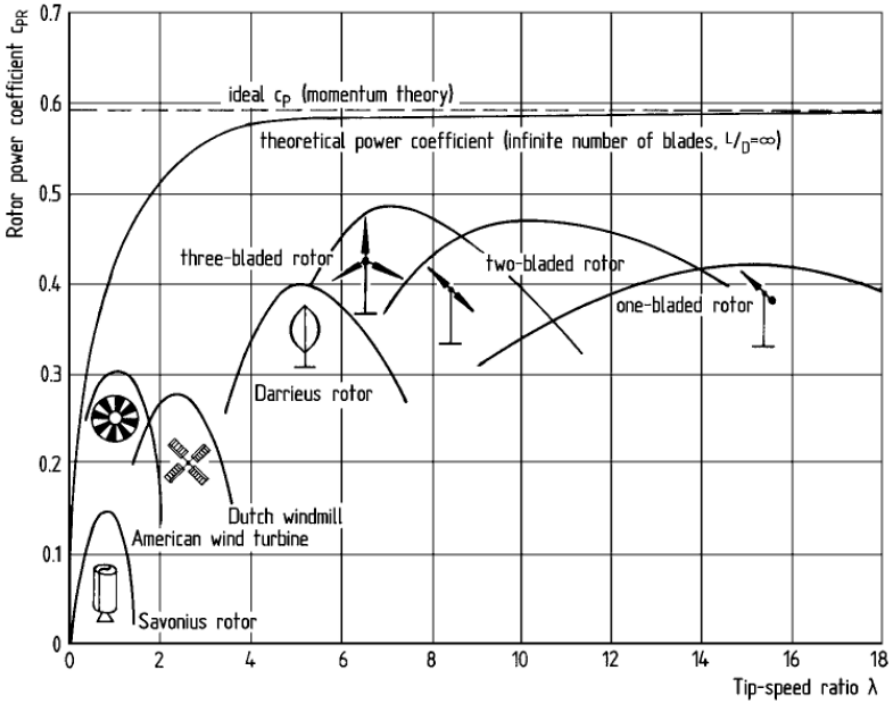
### 2.2.1. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal atau *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) merupakan tipe turbin angin yang pertama kali dibuat oleh manusia. Tipe turbin ini memiliki kelebihan yaitu tidak terpengaruh oleh arah datangnya angin karena sumbunya yang tegak lurus dengan arah datangnya angin sehingga tidak membutuhkan mekanisme pengatur arah seperti ekor turbin yang ada pada turbin angin sumbu horizontal. Hal ini membuatnya cocok digunakan pada daerah dengan angin yang datang dari berbagai arah (Saputra, 2016). Selain itu, pada turbin angin sumbu vertikal, generator dapat ditempatkan pada bagian bawah turbin sehingga memudahkan dalam hal perawatan dan pemeliharaan. Kelebihan lainnya yang dimiliki oleh turbin angin sumbu vertikal adalah tingkat kebisingan yang lebih rendah bila dibandingkan dengan turbin angin sumbu horizontal. Namun, turbin angin sumbu vertikal memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin angin sumbu horizontal sehingga tubin angin sumbu vertikal biasa digunakan untuk konversi listrik skala kecil (Strong, 2008; Adlie, Rizal, & Arjuanda, 2015).

Saat ini, terdapat tiga jenis turbin angin sumbu vertikal yang sering digunakan yaitu turbin angin Savonius, Darrieus, dan H *rotor* (Hapsoro, 2016). Ketiga jenis tersebut dapat dilihat pada gambar berikut.




**Gambar 2.1.** Tipe turbin angin sumbu vertikal
*Sumber: Hau, 2006 dalam Hapsoro, R. A., 2016*




**Gambar 2.2.** Koefisien daya ($C_p$) versus *tip speed ratio* untuk berbagai tipe turbin angin
*Sumber: Hau, 2006 dalam Strong, 2008.*

Gambar di atas menunjukkan koefisien daya ($C_p$) ideal bagi setiap tipe turbin yang umum dipakai. Dari gambar dapat dilihat bahwa turbin angin sumbu horizontal dengan tiga sudu mempunyai $C_p$ yang paling efisien yaitu mencapai

0,49. Sementara turbin lain seperti turbin Darrieus mencapai $C_p$ maksimum sebesar 0,4 sedangkan $C_p$ turbin Savonius hanya mencapai 0,15.

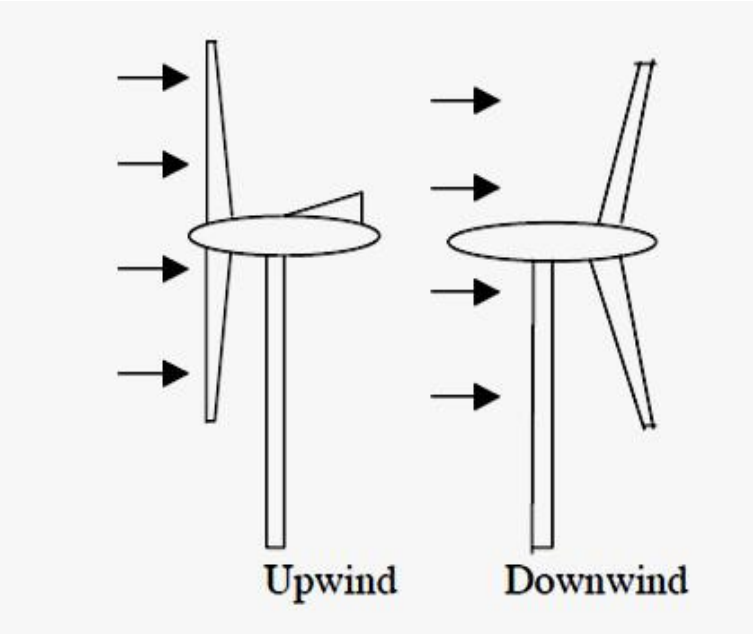
### 2.2.2. Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin angin sumbu horizontal atau *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) adalah turbin angin yang porosnya sejajar dengan arah datangnya angin. Turbin horizontal memiliki sudu-sudu berbentuk *airfoil* seperti bentuk pada sayap pesawat. Bentuk turbin angin horizontal dapat dilihat pada gambar berikut.

**Gambar 2.3.** Turbin angin sumbu horizontal
Sumber: Adlie, Rizal, dan Arjuanda, 2015

Turbin angin sumbu horizontal mempunyai efisiensi yang paling tinggi di antara semua jenis turbin yang dikembangkan saat ini serta dapat menghasilkan energi listrik dalam jumlah yang relatif lebih besar dari pada turbin angin sumbu vertikal. Namun, *rotor* turbin hanya dapat menerima angin dari satu arah saja sehingga diperlukan mekanisme penyearah berupa ekor turbin untuk membantu turbin menghadap ke arah datangnya angin. Selain itu, *rotor* dan generator terletak pada bagian atas menara sehingga menyulitkan dalam proses perawatan dan pemeliharaan (Hapsoro, 2016).

Turbin angin sumbu horizontal dikelompokkan menjadi 2 macam berdasarkan letak *rotor* terhadap arah angin, yaitu *upwind* dan *downwind*. Turbin *upwind* memliki *rotor* yang mengarah langsung ke arah datangnya angin. Sedangkan pada turbin *downwind*, *rotor* turbin akan membelakangi arah datangnya angin. Menara pada turbin akan mengalami turbulensi pada bagian belakangnya sehingga turbin angin biasanya diarahkan melawan arah angin. Sudu-sudu turbin dibuat kaku supaya tidak terdorong menuju menara ketika terjadi angin dengan kecepatan tinggi. Sebagai tambahan, sudu-sudu turbin akan diletakkan didepan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan. Karena turbulensi akan menyebabkan kerusakan pada struktur menara maka sebagian besar turbin angin sumbu horizontal dibuat dengan tipe *upwind*. Namun, meski memiliki permasalahan turbulensi, turbin *downwind* dapat digunakan karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar tetap sejalan dengan arah angin, dan pada saat angin berhembus sangat kencang, bilah-bilahnya dapat ditekuk sehingga mengurangi wilayah tiupan. Dengan demikian akan dapat mengurangi resistensi angin dari bilah-bilah tersebut (Adlie, Rizal, Arjuanda, 2015; Saputra, 2016).




**Gambar 2.4.** Tipe turbin angin sumbu horizontal

*Sumber: Sathyajith, Mathew, 2005 dalam Adlie, Rizal, Arjuanda, 2015*

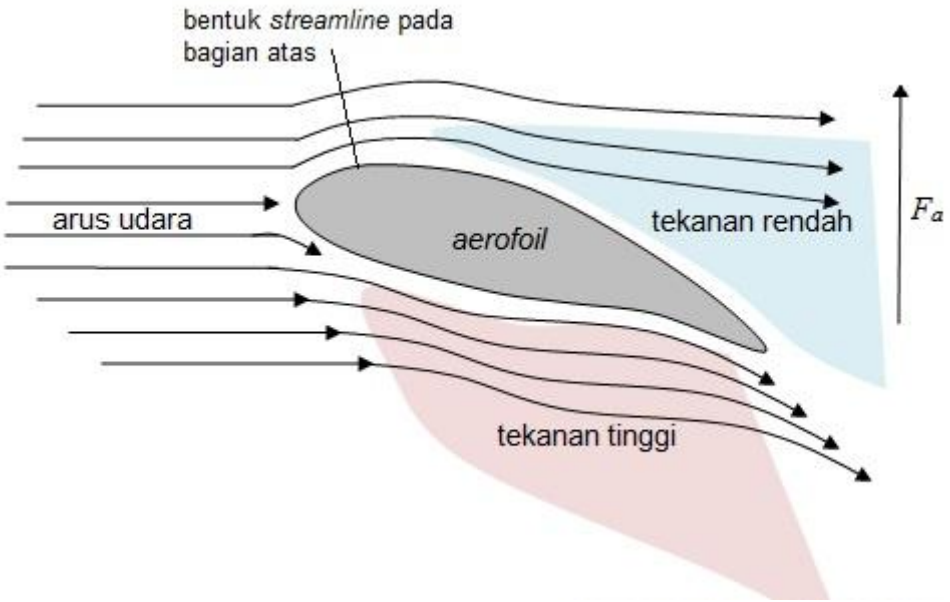
## 2.3. Elemen pada Turbin Angin

Secara umum, sebuah turbin angin sumbu horizontal terdiri atas *blade*, *hub*, generator, ekor, mekanisme *yawing* dan *furling*, menara, dan sistem kontrol serta baterai sebagai tempat penyimpanan daya.

### 2.3.1. Sudu Turbin (*Blade*)

Sudu turbin merupakan salah satu unsur utama pada sebuah turbin. Sudu berperan penting dalam mengonversi energi yang dibawa oleh angin menjadi torsi untuk kemudian diteruskan ke generator. Pertimbagan utama dalam mendesain sebuah sudu ada pada bentuk *airfoil*. Saat ini telah banyak dikeluarkan bentuk-bentuk *airfoil* baik oleh National Advisory Committe for Aeronautics (NACA) atau pun National Renewable Energy Laboratory (NREL). Badan laboratorium nasional NREL telah melakukan penelitian dan merilis beberapa *airfoil* yang cocok digunakan untuk turbin angin sumbu horizontal dengan skala kecil hingga besar. *Airfoil* tersebut diperkirakan memiliki kemampuan dalam peningkatan penyerapan energi angin sebesar 23% - 33%. Turbin angin dengan variasi sudut *pitch* mampu meningkatkan ekstraksi energi sebesar 8% - 20% dan pada turbin dengan variasi jumlah RPM mampu meningkatkan ekstraksi energi sebesar 8% - 10% (Musyafa', 2012).

Ada dua macam gaya yang menggerakkan rotor pada turbin angin, yaitu gaya *lift* dan gaya *drag*. Gaya *lift* adalah gaya pada arah tegak lurus arah aliran yang dihasilkan ketika fluida bergerak melalui benda berpenampang *airfoil*. Jika penampang *airfoil* menyapu udara dengan kecepatan tertentu maka tekanan udara pada bagian atas *airfoil* akan lebih kecil dari pada bagian bawahnya, sehingga menyebabkan adanya gaya angkat pada *airfoil* tersebut yang disebut gaya *lift*. Sedangkan gaya *drag* adalah gaya hambat yang arahnya berlawanan dengan arah gerak benda (Ismail & Ar-Rahman, 2017). Gaya aerodinamis yang dialami *airfoil* ketika dilalui aliran udara ditunjukkan pada gambar berikut ini.




**Gambar 2.5.** Ilustrasi penampakan aliran udara yang melalui suatu *airfoil*

Profil *airfoil* adalah elemen penting dalam konversi energi angin. Perkembangan teknologi telah memberikan kesempatan kepada perancang untuk membuat *blade* dengan bentuk yang bervariasi meluputi bahan, ukuran, jenis, dan jumlah *blade*. Pada turbin angin sumbu horizontal terdapat persyaratan penting yang menuntut tambahan perhatian terhadap jari-jari *blade*, jumlah *blade*, panjang *chord*, jenis *airfoil* dan bahan baku *blade*. Ketika angin bertiup melewati *blade*, maka *blade* akan menghasilkan gaya angkat atau *lift* (L) dan gaya dorong atau *drag* (D). Perubahan gaya angkat dan gaya dorong dipengaruhi oleh bentuk geometri dari *blade*, kecepatan, dan arah angin terhadap garis utama *blade*. Akibat dari perubahan gaya tersebut, nilai torsi dan kecepatan sudut juga akan ikut berubah. Bentuk aerodinamis blade dipengaruhi oleh perubahan sudut serang α (angle of attack). Perubahan sudut serang berpengaruh terhadap kecepatan sudut turbin angin. Hal ini akan berdampak pada tingkat produksi energi angin yang diekstrak melalui blade. Jumlah blade dan dimensi rotor turbin angin mempunyai pengaruh yang besar terhadap kemampuan turbin dalam mengekstrak energi angin yang berhembus melewati blade. Semakin besar ukuran diameter rotor turbin angin maka semakin besar pula area sapuan angin oleh blade sehingga daya yang dihasilkan juga lebih besar (Musyafa', 2012).

Kinerja aerodinamis dari sudu-sudu turbin angin dipengaruhi oleh desain bentuknya. Lee dan Shiah (2016) dalam penelitiannya mendesain turbin dengan menggunakan teori momentum elemen sudu (*Blade Element Momentum Theory*/ BEMT). Sudu (*blade*) dari turbin didesain berbasis BEMT dan panjang *chord* turbin konstan terhadap tipe *non-twist* digunakan untuk desain sudu kedua. Hasil dari percobaan dan simulasi numerik menunjukkan bahwa koefisien daya maksimal yang dihasilkan oleh desain turbin angin berbasis BEMT mengalami peningkatan hingga 50% tanpa terjadi pemisahan aliran bila dibandingkan dengan turbin angin lain.

Pada desain sudu turbin angin berbasis BEMT, aliran udara terjadi secara menyeluruh pada *airfoil* sedangkan pada turbin lain aliran hanya mencakup sekitar 76%. Hal ini terjadi dikarenakan aliran yang melewati sudu turbin berbasis BEMT dengan sudut putar masih melekat pada dasar sudu dekat dengan *leading edge* sehingga pembagian aliran dikontrol secara efektif oleh sudut putar yang digunakan pada sudu turbin berbasis BEMT. Hal ini menjelaskan bahwa sudu turbin berbasis BEMT memiliki koefisien daya maksimum dibandingkan dengan *baseline* pada *Tip Speed Ratio* yang rendah. Kemudian dapat diamati bahwa pemisahan aliran dikembangkan pada sisi hisap (*suction side*) di dekat *leading edge* pada kedua sudu dengan *Tip Speed Ratio* yang rendah.

Pourrajabian et al. (2014) dalam penelitiannya telah mengoptimalisasi parameter *chord* dan *twist* tiga turbin angin skala mikro untuk nilai *output* daya 0,5 kW, 0,75 kW, dan 1 kW. Untuk meningkatkan kinerja turbin pada kecepatan angin yang rendah maka diperlukan nilai *chord* dan *twist* yang lebih besar pada dasar sudu. Kemudian mereka menyimpulkan bahwa ukuran sudu dan penambahan jumlah sudu dapat meningkatkan kinerja awal dan daya yang dihasilkan (*output power*).

### 2.3.2. Hub

Hub merupakan bagian pada *rotor* yang berfungsi untuk menghubungkan sudu-sudu turbin dengan poros utama. *Hub* menyediakan titik koneksi untuk set sudu turbin supaya *rotor* dapat dibentuk. *Hub* menempel pada poros generator

sehingga rotasi sudu turbin dan ditransmisikan ke generator. *Hub* didesain sederhana dan dengan biaya yang murah. Bahan yang digunakan untuk membuat *hub* harus bersifat kuat untuk menahan beban yang diterima selama proses operasi turbin yaitu berupa gaya inersia dari sudu-sudu turbin sewaktu *rotor* berputar. Baja dan aluminium telah lama dipertimbangkan sebagai material pembuatan *hub* karena keduanya memiliki sifat mampu mesin (*machinability*), kekuatan, dan faktor ketersediaanya. Densitas baja yang lebih besar dari pada aluminium menjadikan baja memiliki kekuatan yang lebih besar dari pada aluminium namun penggunaan baja sebagai bahan pembuatan *hub* akan membuat massa turbin menjadi lebih besar.

Dimensi *hub* didesain dengan tepat untuk memastikan kecocokan yang baik dengan poros generator dan *rotor blade*. Jarak radius lubang untuk bilah *rotor* harus akurat untuk menjaga keseimbangan dinamis *rotor*. Jika *rotor* menjadi tidak seimbang, beban siklik akan muncul dan membebani *hub* dan poros generator. Untuk alasan ini, keseluruhan *rotor*, yaitu *hub* dan *blade*, harus seimbang secara dinamis sebelum pemasangan. Setiap modifikasi yang perlu dilakukan ke *hub* untuk memastikan keseimbangan dinamis dapat kemudian dilakukan sebelum dilakukan pemasangan.

### 2.3.3. Generator

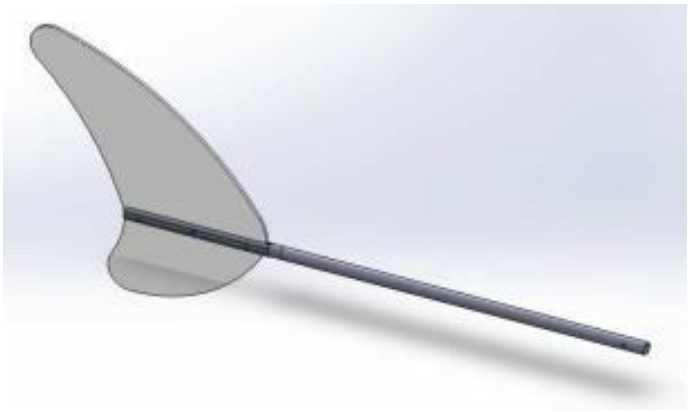
Generator merupakan elemen dasar pada setiap turbin angin. Gerak rotasi yang dihasilkan oleh *rotor* akan dikonversikan menjadi arus listrik oleh generator. Generator menjadi sebutan umum untuk mesin yang dapat mengubah tenaga mekanik menjadi tenaga listrik walaupun banyak tersedia dalam beberapa tipe yang berbeda. Generator dapat dikelompokkan berdasarkan jenis arus yang dihasilkan dan medan listrik. Berdasarkan arus yang dihasilkan, generator dapat dibedakan menjadi generator listrik dinamo dengan arus keluaran DC (arus searah) dan generator listrik alternator dengan keluaran arus AC (arus bolak-balik). Sedangkan menurut medannya, generator dapat dibedakan menjadi generator magnet permanen (*permanent magnet generator*), generator penguat terpisah (*separately excited generator*), generator penguat sendiri (*self excited*

*generator*), generator sinkron, dan generator induksi (Strong, 2008). Generator untuk turbin angin memiliki karakter yang spesifik dibandingkan dengan generator lainnya yaitu mampu menghasilkan energi listrik pada putaran yang rendah (Nurtjahmulyo, 2006 dalam Budiyanto, 2014).

Potensi angin yang tersedia sepanjang tahun pada beberapa daerah di Indonesia menjadi peluang untuk dikonversi menjadi energi listrik. Hasil penelitian yang dilakukan Yusuf pada tahun 2015 menyimpulkan potensi kecepatan angin rata-rata perbulannya yaitu 4-5 m/s (Yusuf Ismail Nakhoda, 2015 dalam Multazam dan Mulkan, 2019). Kondisi demikian juga terdapat di Provinsi Aceh, kecepatan angin rata-rata paling dominan setiap bulannya yaitu 1.6 – 6.5 m/s (Muhammad Rizal Fakri, 2017 dan Khairiaton, 2016 dalam Multazam dan Mulkan, 2019). Rendahnya hembusan angin menjadi hambatan dalam proses konversi listrik karena energi mekanik yang dihasilkan dari putaran turbin angin tidak mencukupi kebutuhan generator. Maka dari itu, penggunaan generator magnet permanen dapat menjadi sousi untuk hambatan tersebut. Generator jenis ini memungkinkan untuk menghasilkan energi listrik pada angin berkecepatan rendah dengan efisiensi yang cukup tinggi sehingga tidak memerlukan *gearbox* atau *pulley* yang besar untuk mendapatkan kecepatan putaran rotor yang tinggi. Selain itu, kemudahan dalam pembuatan dan juga *scaled up* generator magnet permanen lebih memudahkan dalam mendesain generator dengan capaian kapasitas daya, tegangan, dan kecepatan kerja tertentu hanya dengan mengubah parameter seperti kekuatan fluks magnet, jumlah kumparan, jumlah lilitan kumparan stator, jumlah magnet, serta ukuran diameter kawat (Ridwan, 2009 dalam Budiyanto, 2014).

### 2.3.4. Ekor

Ekor adalah salah satu komponen turbin angin sumbu horizontal. Ekor selalu bergerak menjauhi arah datangnya angin, dengan demikian pemasangan ekor dibagian belakang turbin angin mengakibatkan bagian rotor yang berada di muka turbin angin akan selalu menghadap ke arah datangnya angin. Contoh bentuk ekor turbin angin dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 2.6.** Contoh bentuk ekor pada turbin angin
*Sumber: Bachtiar & Hayattul, 2018*

Keseimbangan kekuatan angin pada ekor memastikan bahwa pada saat arah angin berubah, turbin secara otomatis dan seketika mengoreksi arahnya sesuai dengan arah datangnya angin. Dengan begitu, penyediaan untuk bantalan *yaw* diperlukan dalam desain badan turbin. Selain itu, satu set cincin selip diperlukan untuk mencegah kabel listrik dari generator ikut berputar di bagian dalam menara.

Untuk mendapatkan fungsi daun ekor yang optimum, maka luas areanya perlu dihitung. Luas area daun ekor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini.

$$A_{daun\ ekor} = 0{,}04\ x\ A_{sapuan\ sudu\ turbin} \quad (2.8)$$

### 2.3.5. Mekanisme *Yawing* dan *Furling*

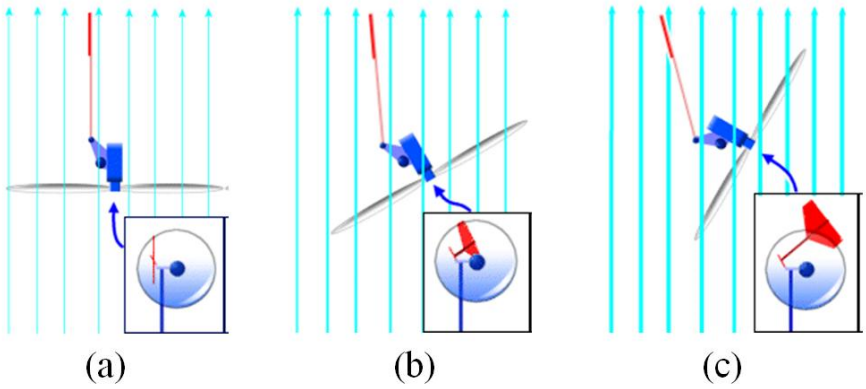
Perputaran badan turbin untuk menyelaraskan dengan arah angin tidak dapat terjadi tanpa adanya mekanisme *yaw*. Turbin angin harus memiliki kebebasan bergerak menggeleng *(yawing)* untuk memastikan arah rotor selalu menghadap arah datangnya angin. Karena angin adalah sumber energi yang terus berfluktuasi, baik dalam intensitas maupun arahnya, *yawing* merupakan proses yang diperlukan untuk menangkap energi angin yang tersedia. Mekanisme *yaw* pada turbin angin ini adalah tempat menempelnya generator dan ekor dengan

kedudukan seperti engsel untuk mengarahkan turbin angin supaya searah dengan arah datangnya angin.

Mekanisme *furling* dirancang guna untuk melindungi turbin dari kerusakan yang mungkin terjadi akibat hembusan angin berkecepatan tinggi. Bahaya yang mengancam turbin pada kondisi angin dengan kecepatan tinggi yaitu sebagai berikut.

a. Besarnya gaya sentrifugal akibat putaran *rotor* yang tinggi
b. Vibrasi yang tinggi
c. Beban dari gaya dorong yg ditimbulkan angin kencang pada struktur turbin angin

Oleh karena itu, mekanisme *furling* didesain untuk mencegah dan mengatasi permasalahan di atas. Mekanisme *furling* memungkinkan *rotor* untuk berpaling dari arah datangnya angin berkecepatan tinggi sebagai upaya proteksi. mekanisme terjadinya *furling* dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



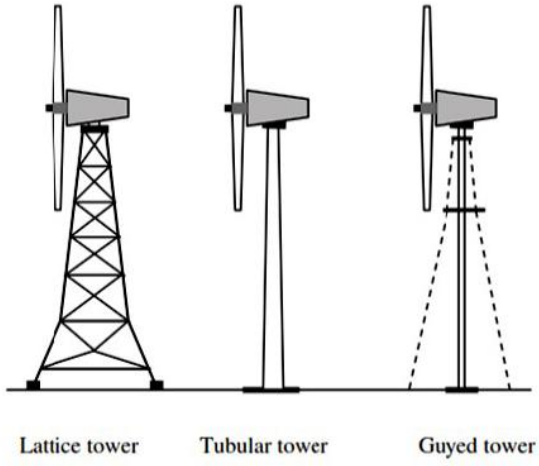

**Gambar 2.7.** Mekanisme *furling*: (a) pada kondisi angin dengan kecepatan normal; (b) pada kondisi angin dengan kecepatan sedang, dan (c) pada kondisi angin dengan kecepatan tinggi

**Sumber:**

### 2.3.6. Menara

Menara merupakan tiang penyangga yang fungsi utamanya adalah untuk menopang *rotor*, *hub*, dan semua komponen turbin angin yang berada di atasnya. Menara dibuat dengan material yang sangat kuat agar dapat menahan beban akibat

gaya berat turbin angin dan gaya dari angin supaya dapat mendukung turbin angin dalam mempertahankan getaran terutama saat cuaca buruk yang memiliki kecepatan dan arah angin yang tidak stabil. Di antara bahan-bahan yang digunakan untuk membuat menara yaitu pipa baja, beton, rangka besi, ataupun dari bahan *fiber glass* yang diperkuat polimer (GFRP). Menara yang digunakan dapat berupa tipe latis (*lattice*), pipa (*tubular*), atau tipe *guyed tower*, yaitu menara yang dilengkapi dengan tali pancang. Bentuk ketiga tipe menara tersebut dapat dlihat pada gambar berikut ini.




**Gambar 2.8.** Jenis-jenis menara

*Sumber: Sathyajith, Mathew, 2005 dalam Adlie, Rizal, & Arjuanda, 2015)*

Menara tubular merupakan menara yang dirangkai dari beberapa tabung silinder yang dapat dibuat dari beton ataupun baja. Setiap tabung silinder dihubungkan dengan cara dilas sampai mencapai ketinggian yang direncanakan. Menara latis merupakan menara yang terdiri atas rangkaian dari baja-baja siku yang dihubungkan dengan menggunakan baut dan mur. Sedangkan *guyed tower* merupakan menara yang dilengkapi dengan kabel yang dipancangkan pada tanah sebagai penyangga menara. Bentuk menara tubular berupa menara tunggal dengan bentuk yang mengecil pada bagian atas menjadi pertimbangan dalam nilai estetika bila dibandingkan dengan menara tipe lain. Namun, menara tubular membutuhkan pondasi yang lebih kuat untuk menopang seluruh beban yang berada di atasnya. Untuk menara ukuran kecil, menara dengan tipe *guyed* memiliki ketahanan

mekanik yang lebih baik serta biaya instalasi yang lebih murah (Jha, 2011 dalam Hapsoro, 2016; dan Zulkarnain, 2016).

Menara dibutuhkan untuk meninggikan rotor supaya memaksimalkan kecepatan angin yang tersedia dan meminimalkan turbulensi. Semakin tinggi menara, tenaga angin yang dapat diekstraksi oleh turbin lebih besar pula. Namun, peningkatan ketinggian menara mengarah langsung pada peningkatan total biaya keseluruhan selain biaya transportasi dan pemasangan. Selain itu juga akan menyulitkan proses perawatan turbin angin. Untuk turbin angin horizontal, ketinggian menara dibuat sekitar dua hingga tiga kali panjang *blade* (sudu turbin) untuk menyeimbangkan biaya material menara terhadap pemanfaatan komponen aktif lainnya yang lebih baik dan tentunya berharga cukup mahal.

### 2.3.7. Sistem Kontrol dan Kelistrikan

Sistem kontrol dan kelistrikan merupakan bagian akhir yang perlu dipertimbangkan dari desain sebuah turbin angin. Untuk memindahkan daya yang telah dihasilkan oleh generator dari atas menara turbin angin ke bagian dasar menara, maka dibutuhkan kabel sebagai penghantar daya. Kabel-kabel tersebut haruslah dilengkapi dengan sistem pengontrol (*controller*) untuk mengatur arus listrik yang mengalir ke baterai setelah sebelumnya mengubah tegangan AC ke DC melalui *rectifier*. Kontroler merupakan sebuah perangkat yang berfungsi untuk mengatur masuknya daya ke baterai selama turbin beroperasi. Kontroler akan memonitor tegangan yang masuk ke baterai supaya mencegah masuknya daya berlebih ke dalam baterai.

### 2.3.8. Penyimpanan Daya

Dalam banyak aplikasi baterai yang digunakan untuk menyimpan daya listrik yang dihasilkan, inverter sering digunakan untuk mengonversi listrik yang dihasilkan. Karena angin tidak selalu tersedia maka energi disimpan ke dalam baterai.

Baterai yang digunakan harus mampu menahan siklus pengisian dan pelepasan arus listrik yang konstan sehingga dibutuhkan standar yang lebih tinggi

dari pada baterai konvensional, seperti baterai yang digunakan pada mesin kedaraan. Jenis baterai yang sesuai dengan kondisi seperti ini yaitu baterai *deep cycle* (*deep cycle battery*) yang dirancang untuk dapat menghasilkan energi yang stabil dan dalam waktu yang lama. Baterai ini mempunyai ketahanan terhadap siklus pengisian dan pelepasan arus yang berulang-ulang dan konstan. Baterai ini dapat digunakan hingga 80% dari kapasitas nominalnya sehingga kapasitas energi yang dapat digunakan lebih besar tanpa harus merusak dan mengurangi umur kerja baterai.

## 2.4. Simulasi Sudu Turbin Angin Menggunakan Aplikasi *Q-Blade*

Konversi dari energi angin menjadi energi mekanik menggunakan turbin angin yang efisien memerlukan desain yang optimal pada sudu turbin. Metode pengembangan secara cepat, prediksi yang andal dan kuat mengenai karakteristik aerodinamika dan simulasi kondisi aliran di sekitar sudu turbin sangat penting untuk desain awal turbin angin di pesisir Gampong Alue Naga.

Perangkat desain dan evaluasi yang berdasarkan metode *Blade Element Momentum* (BEM) digunakan untuk memprediksi efisiensi turbin angin sumbu horizontal. BEM diterapkan secara luas pada pengembangan turbin angin karena penggunaan teknik analisis dengan akurasi yang baik dan sederhana selama proses desain sudu turbin. Model BEM diperlukan untuk mengembangkan dan menguji desain sudu turbin yang berbeda satu sama lain dengan cepat dimana peneliti dapat melakukan perubahan kecil dan mensimulasikannya kembali. Hingga saat ini, hampir semua desain sudu turbin angin sumbu horisontal modern menggunakan model BEM.

Perangkat lunak *Q-Blade* dirancang sebagai bagian dari proyek kelompok energi angin di Jurusan Mekanika Fluida Eksperimental, Berlin Technical University, yang dipimpin oleh Prof. Dr. Christian Oliver Paschereit. Tujuan dari proyek ini adalah untuk menyediakan perangkat lunak untuk penghitungan turbin *open source* yang diintegrasikan ke *xfoil* (sebuah alat desain dan analisis *airfoil*). Selain itu, perangkat lunak dibuat sebagai solusi untuk desain dan perhitungan aerodinamis dari sudu turbin angin. Integrasi ke *xfoil* memungkinkan pengguna

untuk dengan cepat merancang *airfoil* yang diinginkan, menghitung polarnya, mengekstrapolasi data polar ke kisaran $360^0$, dan mengintegrasikannya ke dalam simulasi turbin angin secara langsung.

Berdasarkan *Q-Blade Guidelines*, David Marten dan Juliane Wendler, 2013), fungsi perangkat lunak BEM adalah sebagai berikut.

- Ekstrapolasi data *xfoil* yang dihasilkan atau diimpor ke sudut serang $360^0$
- Desain dan optimisasi sudu turbin yang canggih, termasuk visualisasi 3D, menggunakan profil yang dihasilkan atau diimpor dari *xfoil*
- Desain turbin angin seperti sudu turbin angin, kontrol turbin, tipe generator, dan kerugian
- Perhitungan kinerja sudu turbin angin pada kisaran *Tip Speed Ratio* ($\lambda$)
- Perhitungan kinerja turbin angin pada kisaran kecepatan angin (V)
- Perhitungan hasil tahunan dengan distribusi Weibull
- Pemilihan algoritma koreksi model BEM dan *Double-Multiple Streamtube* (DMS) secara manual
- Pemilihan semua parameter simulasi secara manual yang relevan
- Penelusuran visualisasi data hasil setelah proses simulasi
- Fungsi ekspor untuk semua data simulasi yang dilakukan
- Ekspor geometri sudu turbin angin dalam format .stl
- Menyimpan proyek simulasi sudu turbin angin dalam basis data *runtime*

# BAB III
# METODOLOGI PENELITIAN

## 3.1. Metode Penelitian

Penelitian yang digunakan adalah menggunakan jenis kuantitatif dengan pengolahan data dan pendekatan deskriptif. Penelitian ini dilakukan dengan mensimulasikan kecepatan angin di Pesisir Alue Naga dengan bentuk geometri *airfoil* NREL S816 dengan daya yang direncanakan sebesar 1 kW, dan dengan radius rotor 2 m yang akan dikonversi menjadi energi listrik.

## 3.2. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara simulasi menggunakan perangkat lunak *Q-Blade* dan desain turbin angin selama dua bulan yaitu dari bulan Agustus s.d. bulan Desember 2019. Lokasi pengukuran kecepatan angin dilakukan di pesisir Gampong Alue Naga, Kota Banda Aceh (Gambar 3.1). Pengolahan data dan simulasi penelitian ini dilakukan di Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry, Jln. Tgk. Syech Abdur Rauf, Darussalam, Banda Aceh, Provinsi Aceh.

**Gambar 3.1.** Peta lokasi pengukuran kecepatan angin di pesisir Gampong Alue Naga, Kota Banda Aceh

*Sumber: Google Earth Pro, 2019*

**Gambar 3.2.** Kondisi titik lokasi pemgambilan sampel kecepatan angin di pesisir Gampong Alue Naga, Kota Banda Aceh

### 3.3. Alat dan Bahan

Pada penelitian ini menggunakan alat dan bahan sebagai berikut:

1. Anemometer dengan tipe Lutron AM-4222 untuk mengukur kecepatan angin di Pesisir Alue Naga;
2. Kamera untuk dokumentasi kegiatan pengukuran kecepatan angin di Pesisir Alue Naga;
3. Microsoft Excel untuk menganalisis data kecepatan angin di Pesisir Alue Naga;
4. *Airfoil* NREL S816 sebagai bahan dasar untuk desain awal aerodinamis sudu turbin di Pesisir Alue Naga; dan
5. Perangkat lunak *Q-Blade* untuk mensimulasikan desain awal turbin angin dengan memasukkan data hasil kecepatan angin rata – rata yang diambil atau diukur langsung di Pesisir Alue Naga selama 30 hari.

**Gambar 3.3.** Anemometer Lutron AM-4222 sebagai alat pemgambilan sampel kecepatan angin di pesisir Gampong Alue Naga, Kota Banda Aceh

## 3.4. Tahap Penelitian

### 3.4.1. Tahap Persiapan

Tahapan persiapan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Studi literatur

   Kegiatan ini diawali dengan mempelajari beberapa literatur dari penelitian-penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan studi desain turbin angin untuk pembangkit tenaga listrik. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan arahan dan wawasan sehingga mempermudah dalam proses pengumpulan data, analisis data, serta dalam penyusunan laporan.

2. Survei data kecepatan angin

   Survei data kecepatan angin diperoleh dari hasil pengukuran kecepatan angin di pantai Gampong Alue Naga.

3. Penentuan profil *airfoil*

   *Airfoil* yang dipilih adalah *airfoil* yang mempunyai karakteristik yang cocok untuk digunakan pada turbin angin dengan angin *start up* yang rendah yang telah dirilis oleh NREL.

### 3.4.2. Data Penelitian

Untuk menunjang penelitian yang akan dilakukan, maka diperlukan data primer dan data sekunder.

1. Data Primer

Data primer yang dibutuhkan dari obervasi lapangan dan data hasil simulasi menggunakan aplikasi *Q-Blade* adalah sebagai berikut.

a) Kecepatan angin selama 30 hari di Pesisir Alue Naga ($v$);
b) Tip speed ratio ($\lambda$)
c) Bilangan Reynolds ($Re$)
d) Koefisien daya ($C_p$)
e) Penampang geometri *airfoil*
f) Panjang *chord* ($c$) pada tiap segmen geometri *airfoil*
g) Nilai $C_L/C_D$ maksimum pada penampang geometri *airfoil*
h) Bahan atau material dasar untuk komponen mekanik turbin angin
i) Generator listrik yang digunakan dan efisiensinya ($\eta_{gen}$)

2. Data Sekunder

Data sekunder yang diperlukan adalah sebagai berikut:

a) Peta *lay out* Pesisir Alue Naga

## 3.5. Desain Sudu Rotor Menggunakan Perangkat Lunak *Q-Blade*

Untuk mendesain sudu, beberapa parameter seperti daya, *Tip Speed Ratio* ($\lambda$), *chord* ($c$), dan sudut serang (AOA) akan dikaji. Bilangan Reynolds ($Re$) untuk *airfoil* pada dasarnya mempengaruhi kinerja aerodinamis dari sebuah turbin angin dan dapat dinyatakan dalam persamaan di bawah ini.

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} = \frac{UD}{v} \qquad (3.3)$$

dimana:

Re= bilangan Reynolds

$D$ = diameter rotor turbin (m)

$U$ = kecepatan angin (m/s)

$\rho$ = massa jenis udara (1,164 kg/m$^3$)
μ = viskositas dinamis udara (1,025 x 10$^{-5}$ kg/m.s)
v = viskositas kinematis udara (1,608 x 10$^{-5}$ m$^2$/s)

Nilai Bilangan Reynolds berbanding lurus dengan kecepatan angin (*U*) dan diameter rotor turbin (*D*). Turbin angin skala besar beroperasi lebih baik dengan Bilangan Reynolds yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin skala kecil. Selain itu, dengan berkurangnya Bilangan Reynolds, maka koefisien *lift* maksimum juga akan berkurang namun koefisien *drag* maksimum mengalami sedikit peningkatan. Hal ini mengindikasikan bahwa rasio *lift* dan *drag* berkurang secara tajam dengan menurunnya nilai Bilangan Reynolds, sehingga mengakibatkan kinerja yang tidak mencukupi dari turbin angin skala besar dengan sumbu horizontal. Oleh karena itu, akan lebih berguna bila memilih bentuk *airfoil* dengan rasio *lift* dan *drag* maksimum untuk desain turbin angin skala besar.

*Output* daya ($P_T$) yang dihasilkan oleh turbin angin dapat dihitung dengan persaman berikut.

$$P_T = C_P.\frac{1}{2}.\rho.U^3.\eta_{Gen}.A \tag{3.4}$$

dimana:
$C_P$ = koefisien daya (maksimum 16/27)
$U$ = kecepatan angin (m/s)
$\rho$ = massa jenis udara (1,164 kg/m$^3$)
$A$ = luas area sapuan sudu turbin atau luas linkaran $\pi R^2$ (m$^2$)
$R$ = jari-jari dari sudu turbin (m)

Koefisien daya untuk turbin angin tertentu berbeda dengan *tip speed ratio*. Rasio kecepatan ujung sudu rotor (*rotor blade tip*) terhadap kecepatan angin disebut *Tip Speed Ratio* (λ) yang dijelaskan dalam persamaan berikut ini.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \tag{3.5}$$

dimana:

$\Omega$ = kecepatan sudut atau angular = $\frac{2\pi N}{60}$ dengan N = kecepatan rotor dalam satuan RPM

$R$ = jari-jari sudu turbin (m)

$U$ = kecepatan angin (m/s)

Koefisien daya maksimum ($C_P$) dari sebuah turbin angin menilik 2 (dua) parameter utama, yaitu distribusi *chord* dan *twist* sudu turbin. Pada kondisi angin dengan kecepatan rendah, nilai *chord* dan *twist* yang besar pada dasar sudu turbin angin akan memberikan kinerja yang unggul. *Output* daya dan kinerja awal dari sudu turbin angin dapat ditingkatkan dengan memperbesar ukuran dan jumlah sudu. Hugh Piggots telah merumuskan persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung lebar sudu (*chord)* sebagai fungsi jarak dari pusat rotasi dengan menggunakan pendekatan Betz sebagai berikut.

$$c = \frac{16\,\pi\,.\;R(^{R}/_{r})}{9\,.\;\lambda^2 B} \tag{3.6}$$

dimana:

$c$ = panjang *chord*

R = radius rotor

$r$ = posisi *chord* atau jari-jari sudu lokal

$\lambda$ = *Tip Speed Ratio*

$B$ = jumlah sudu

Untuk meningkatkan kinerja turbin angin pada angin dengan kecepatan rendah maka diperlukan panjang *chord* yang lebih besar di bagian pangkal sudu (dekat dengan pusat/*root*) dan lebih kecil di bagian ujung sudu.

Bagian *root* diatur pada *twist angle* yang tinggi sehingga berkontribusi terhadap kinerja awal yang rendah karena *twist angle* yang besar membuat bagian *root* memiliki sudut serang atau *angle of attack* (AOA) yang baik pada angin dengan *start-up* yang rendah, namun akan cenderung mengalami *stall* pada saat kecepatan angin tinggi. Selain itu, *twist angle* pada bagian ujung sudu (*tip section*)

juga rendah sehingga akan membuat *tip section* cenderung mengalami *stall* pada saat kecepatan angin tinggi namun akan lebih berkontribusi ketika kecepatan angin rendah.

### 3.6. Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Persiapan kegiatan di awal seperti pengumpulan materi dan bahan pendukung pada bulan Juli 2019, penyusunan proposal bulan Juli 2019 dan Agustus2019. Konsultasi dengan Bappeda Kota Banda Aceh dilakukan sampai akhir penelitian. Pelaksanaan penelitian seperti pengumpulan data data primer dan sekunder dan tahap akhir yaitu desain turbin angin dimana anginnya bersumber dari angin di Pesisir Alue Naga, Banda Aceh, dimulai dari bulan November 2019. Jadwal pelaksanaan atau *timeline* kegiatan penilitian ini selengkapnya dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.1**. Jadwal pelaksanaan penelitian.

| **Kegiatan** | **Tahun 2019** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Juli** | | | | **Agustus** | | | | **September** | | | | **Oktober** | | | | **November** | | | |
| **Persiapan Kegiatan** | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1. Pengumpulan materi dan bahan pendukung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. Penyusunan Proposal Penelitian | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 Konsultasi ke Bappeda Kota Banda Aceh | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Pelaksanaan Penelitian** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Obervasi lapangan | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. Pengolahan data primer dan sekunder | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3. Simulasi di *software Q-Blade* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4. Penyusunan BAB IV dan BAB V | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5. Penyelesaian laporan hasil penelitan | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

# BAB IV
# HASIL DAN PEMBAHAAN

## 4.1. Kecepatan Angin di Pesisir Gampong Alue Naga

Pengukuran nilai kecepatan angin dilakukan di Pantai Gampong Alue Naga pada koordinat 5°36’21” N dan 95°21’35” E. Alat yang digunakan untuk pengukuran adalah anemometer dengan tipe Lutron AM-4222. Waktu pengukuran dibagi ke dalam tiga sesi yaitu pagi hari pada pukul 09.00 WIB s.d. 10.00 WIB, siang hari pada pukul 12.00 WIB s.d. 13.00 WIB, dan sore hari pada pukul 16.00 WIB s.d. 17.00 WIB. Data – data hasil pengukuran dapat dilihat pada sajian tabel berikut ini.

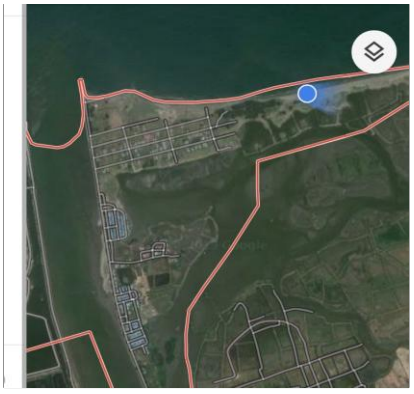
**Tabel. 4.1.** Data hasil pengukuran kecepatan angin di pesisir Gampong Alue Naga

| No. | Tanggal | Waktu | Cuaca | Arah Angin | Temperatur ($^oC$) | Kecepatan Rata-Rata (m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 16 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan | Barat Daya | 32.5 | 4.67 |
| | | 12.00 - 13.00 | Berawan | Tenggara | 31.4 | 4.55 |
| | | 16.00 - 17.00 | Mendung | Timur Laut | 29.8 | 5.40 |
| 2 | 17 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah | Utara | 30.9 | 3.58 |
| | | 12.00 - 13.00 | Cerah Berawan | Barat Laut | 31.2 | 4.67 |
| | | 16.00 - 17.00 | Mendung | Timur Laut | 29.6 | 3.48 |
| 3 | 18 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah | Timur | 29.8 | 4.28 |
| | | 12.00 - 13.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 29.7 | 4.87 |
| | | 16.00 - 17.00 | Cerah | Tenggara | 30.0 | 4.45 |
| 4 | 19 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 30.0 | 6.83 |
| | | 12.00 - 13.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 30.0 | 7.58 |
| | | 16.00 - 17.00 | Berawan | Timur | 28.7 | 3.38 |
| 5 | 20 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 30.1 | 3.67 |
| | | 12.00 - 13.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 29.6 | 8.77 |
| | | 16.00 - 17.00 | Mendung | Timur Laut | 28.7 | 7.80 |
| 6 | 21 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan | Utara | 30.5 | 6.08 |
| | | 12.00 - 13.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 30.6 | 8.28 |
| | | 16.00 - 17.00 | Mendung | Timur Laut | 29.7 | 8.83 |
| 7 | 22 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan | Barat | 29.3 | 9.93 |
| | | 12.00 - 13.00 | Cerah Berawan | Barat Laut | 29.5 | 11.07 |
| | | 16.00 - 17.00 | Berawan | Tenggara | 29 | 3.95 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 23 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan | Timur | 30.8 | 6.45 |
| | | 12.00 - 13.00 | Mendung | Timur Laut | 29.8 | 8.35 |
| | | 16.00 - 17.00 | Mendung | Barat Laut | 28 | 9.01 |
| 9 | 24 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Mendung (Berkabut) | Timur laut | 29.7 | 2.00 |
| | | 12.00 - 13.00 | Mendung (Berkabut) | Tenggara | 29.9 | 3.53 |
| | | 16.00 - 17.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 28.9 | 5.48 |
| 10 | 25 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah | Tenggara | 36.2 | 3.3 |
| | | 12.00 - 13.00 | Cerah | Timur | 35.8 | 2.6 |
| | | 16.00 - 17.00 | Berawan | Timur | 30.8 | 3.4 |
| 11 | 26 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan | Timur | 30.6 | 3.6 |
| | | 12.00 - 13.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 31.1 | 9.6 |
| | | 16.00 - 17.00 | Berawan | Timur Laut | 29.8 | 8.4 |
| 12 | 27 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah | Timur | 33.1 | 3.2 |
| | | 12.00 - 13.00 | Berawan | Timur Laut | 30.9 | 3.9 |
| | | 16.00 - 17.00 | Berawan | Timur Laut | 29.6 | 4.2 |
| 13 | 28 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan | Timur Laut | 29.7 | 6.1 |
| | | 12.00 - 13.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 29.4 | 9.3 |
| | | 16.00 - 17.00 | Berawan | Timur | 29.4 | 3.8 |
| 14 | 29 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan | Tenggara | 33.7 | 5.6 |
| | | 12.00 - 13.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 31.4 | 10.8 |
| | | 16.00 - 17.00 | Cerah | Tenggara | 30 | 8.3 |
| 15 | 30 November 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan | Tenggara | 33.5 | 4.4 |
| | | 12.00 - 13.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 33.3 | 6.8 |
| | | 16.00 - 17.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 30 | 4.0 |
| 16 | 1 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan | Barat Laut | 29.2 | 4.4 |
| | | 12.00 - 13.00 | Cerah Berawan | Utara | 28.8 | 3.0 |
| | | 16.00 - 17.00 | Berawan | Timur Laut | 28.3 | 8.7 |
| 17 | 2 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Hujan Ringan | Timur Laut | 27.8 | 5.9 |
| | | 12.00 - 13.00 | Hujan Ringan | Timur Laut | 28.4 | 9.3 |
| | | 16.00 - 17.00 | Mendung | Timur Laut | 27.6 | 8.4 |
| 18 | 3 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 29.9 | 2.4 |
| | | 12.00 - 13.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 29.1 | 5.4 |
| | | 16.00 - 17.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 29.4 | 1.5 |
| 19 | 4 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah Berawan | Timur | 32.5 | 2.4 |
| | | 12.00 - 13.00 | Berawan | Timur Laut | 31.5 | 3.5 |
| | | 16.00 - 17.00 | Cerah | Timur Laut | 30 | 4.1 |
| 20 | 5 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan | Timur Laut | 30.7 | 4.2 |
| | | 12.00 - 13.00 | Mendung | Timur | 31.2 | 6.8 |
| | | 16.00 - 17.00 | Berawan | Timur Laut | 29.5 | 4.2 |
| 21 | 6 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah Berawan | Tenggara | 31.9 | 5.1 |
| | | 12.00 - 13.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 29.1 | 10.3 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 16.00 - 17.00 | Berawan | Timur Laut | 28.6 | 13.0 |
| 22 | 7 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 35.4 | 8.0 |
| | | 12.00 - 13.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 29.4 | 6.6 |
| | | 16.00 - 17.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 29.7 | 7.6 |
| 23 | 8 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah | Selatan | 36 | 3.7 |
| | | 12.00 - 13.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 27.9 | 7.5 |
| | | 16.00 - 17.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 27.4 | 10.7 |
| 24 | 9 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Berawan | Selatan | 30.8 | 4.6 |
| | | 12.00 - 13.00 | Cerah Berawan | Selatan | 30.9 | 4.4 |
| | | 16.00 - 17.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 28.2 | 8.2 |
| 25 | 10 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah Berawan | Tenggara | 31.3 | 1.7 |
| | | 12.00 - 13.00 | Hujan Ringan (Lokal) | Timur Laut | 30.2 | 13.3 |
| | | 16.00 - 17.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 27.7 | 10.5 |
| 26 | 11 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah | Tenggara | 30.4 | 2.9 |
| | | 12.00 - 13.00 | Cerah | Selatan | 32.5 | 3.2 |
| | | 16.00 - 17.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 29.8 | 6.8 |
| 27 | 12 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah | Tenggara | 35.3 | 5.6 |
| | | 12.00 - 13.00 | Cerah Berawan | Selatan | 33.1 | 6.4 |
| | | 16.00 - 17.00 | Cerah Berawan | Tenggara | 30.5 | 5.3 |
| 28 | 13 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah | Tenggara | 33.3 | 6.3 |
| | | 12.00 - 13.00 | Cerah Berawan | Tenggara | 31.8 | 11.5 |
| | | 16.00 - 17.00 | Cerah Berawan | Selatan | 30.8 | 8.4 |
| 29 | 14 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Cerah Berawan | Timur Laut | 28.8 | 7.9 |
| | | 12.00 - 13.00 | Berawan | Timur Laut | 31.7 | 4.1 |
| | | 16.00 - 17.00 | Berawan | Timur Laut | 28.5 | 9.8 |
| 30 | 15 Desember 2019 | 09.00 - 10.00 | Mendung | Tenggara | 28.1 | 3 |
| | | 12.00 - 13.00 | Mendung | Timur Laut | 31.7 | 6.4 |
| | | 16.00 - 17.00 | Berawan (Mendung) | Timur Laut | 29.8 | 10.5 |
| **Rata – Rata** | | | | | **30** | **6,1** |

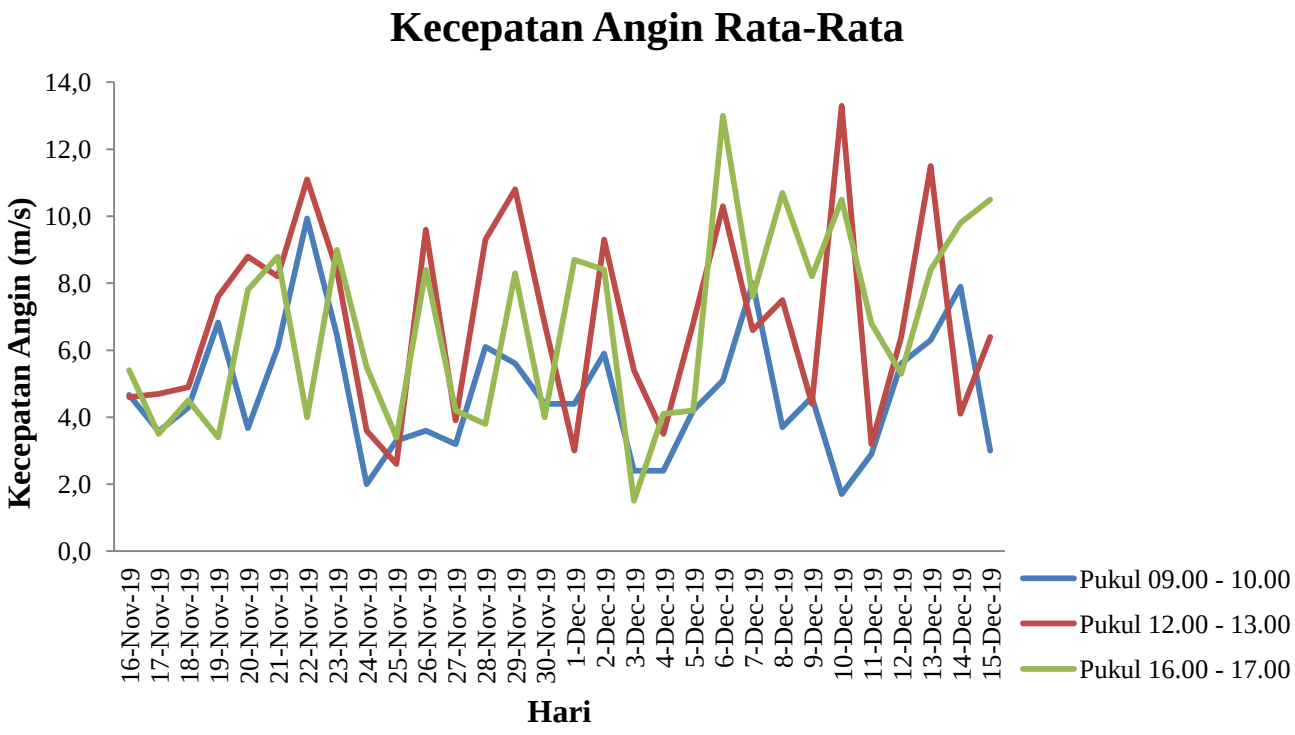
Berikut ini merupakan grafik yang menunjukkan statistik kecepatan angin di Pesisir Alue Naga berdasarkan waktu pengukuran.



Informasi titik lokasi

Nama Lokasi: Alue Naga

Titik koordinat 5°36’21” N dan 95°21’35” E




**Gambar 4.1.** Statistik kecepatan angin rata-rata selama 30 hari di pesisir Gampong Alue Naga.

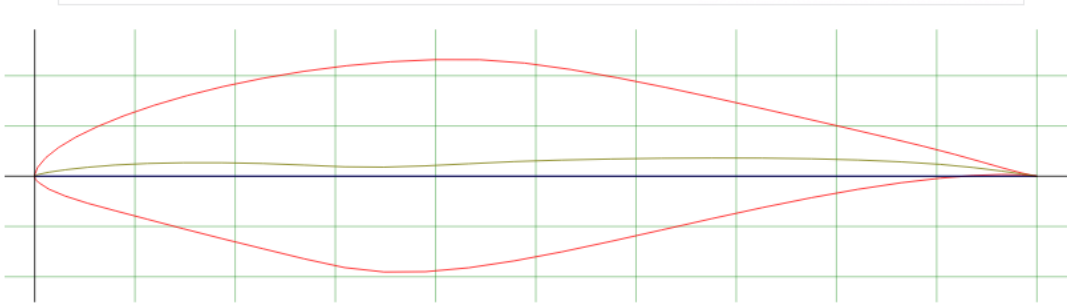
Berdasarkan data yang terdapat pada tabel data hasil pengukuran beserta grafiknya maka dapat dilihat fluktuasi nilai rata – rata kecepatan angin di Gampong Alue Naga selama tiga puluh hari. Nilai kecepatan angin tertinggi

diperoleh pada tanggal 10 Desember 2019 dengan perolehan nilai kecepatan angin yaitu sebesar 13.3 m/s yang terjadi pada pukul 12.00 WIB s.d. 13.00 WIB. Sedangkan nilai kecepatan angin terendah diperoleh pada tanggal 3 Desember 2019 dengan perolehan nilai kecepatan angin hanya sebesar 1,5 m/s. Arah angin dominan yang terjadi selama pengukuran adalah dari arah timur laut. Nilai rata – rata kecepatan angin dan temperatur yang diperoleh secara berturut – turut adalah sebesar 6,1 m/s dan dengan suhu 30℃. Berdasarkan tabel klasifikasi kecepatan angin menurut Beaufort (Tabel 1.2.) maka nilai kecepatan angin yang diperoleh dari hasil pengukuran di Pesisir Alue Naga Kota Banda Aceh termasuk ke dalam kategori angin dengan kecepatan sedang, yaitu berada pada kisaran 20 km/jam s.d. 29 km/jam.

## 4.2. Desain Turbin Angin

### 4.2.1. Sudu Turbin (*Blade*)

Dalam penelitian ini, *airfoil* yang digunakan adalah *arfoil* dengan tipe NREL's S816. Bentuk penampang *airfoil* NREL S816 dapat dilihat pada gambar berikut.



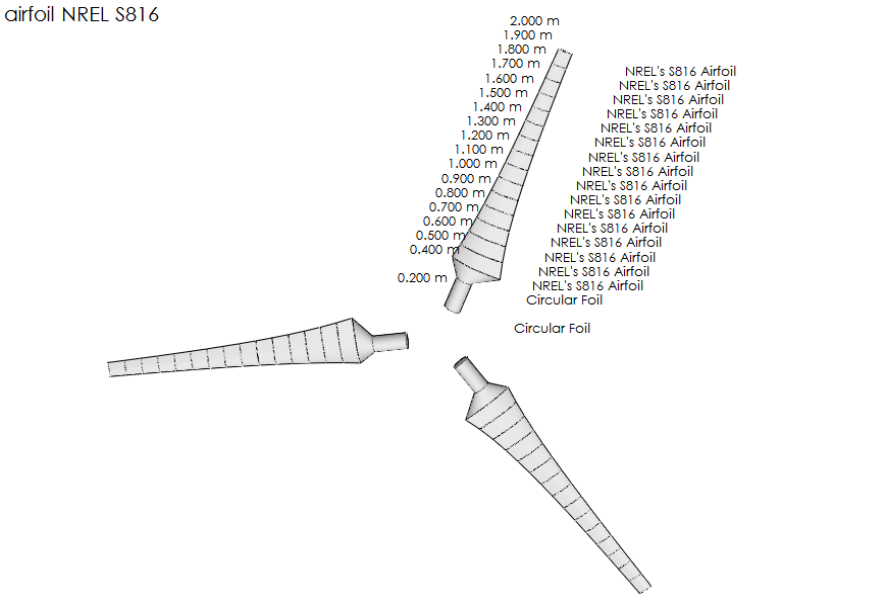
**Gambar 4.2.** Bentuk penampang *airfoil* NREL S816

*Sumber: airfoiltools.com*

Berdasarkan informasi yang diperoleh pada *website* resmi NREL, *airfoil* ini mempunyai *thickness* (ketebalan) sebesar 21,05% dari panjang *chord* dan dengan *chamber* (kelengkungan) sebesar 1,81% dari garis *chord* (*chord line*). Pada dasarnya, semakin tebal dan lengkung sebuah *airfoil* maka semakin besar pula koefisien *lift* yang dihasilkan. Namun ketebalan *airfoil* juga berbanding lurus dengan peningkatan gaya *drag* dan kelengkungan juga akan mempersempit sudut

serang (*angle of attack*) sehingga akan cepat terjadi *stall* diluar sudut serang yang kecil tersebut. Namun, dikarenakan turbin yang didesain berskala kecil, maka hal tersebut tidak terlalu berpengaruh besar terhadap desain turbin ini.

Hasil desain sudu turbin dengan menggunakan *airfoil* NREL S816 yang didesain pada *software Q-blade* ditunjukkan di gambar berikut.




**Gambar 4.3.** Model sudu turbin angin dengan menggunakan *airfoil* NREL S816 hasil dari desain pada *software Q-Blade*

Spesifikasi desain sudu turbin horizontal kecepatan angin kecil ditunjukkan pada tabel berikut.

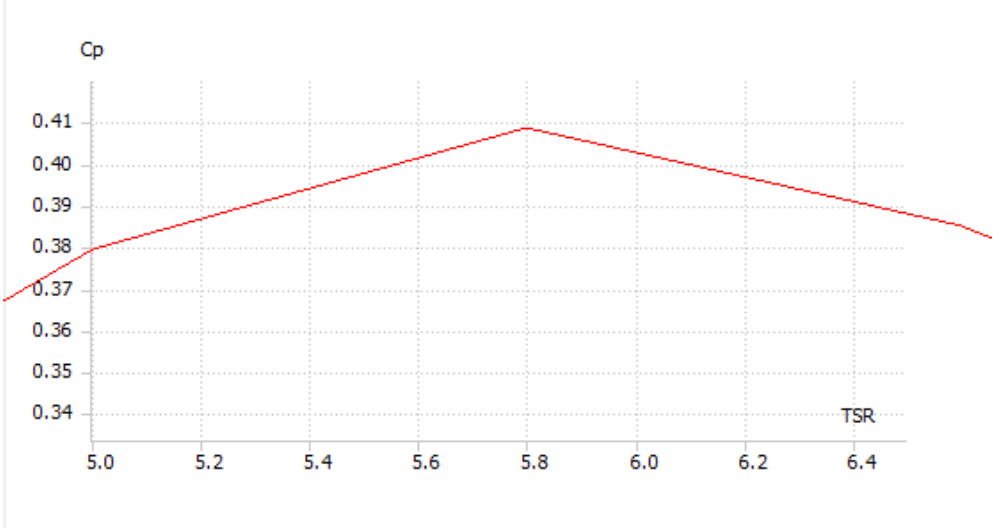
**Tabel 4.2.** Spesifikasi rancangan sudu turbin angin Alue Naga

| **Parameter** | **Bilangan** |
|---|---|
| Diameter turbin, $D$ | 4 m |
| Kecepatan angin rata – rata Pesisir Alue Naga, $U$ | 6,1 m/detik |
| Massa jenis udara, $\rho$ (pada 30 $^0$C) | 1,164 kg/m$^3$ |
| Viskositas kinematik udara, $\nu$ (pada 30 $^0$C) | 1,608 x 10$^{-5}$ m$^2$/detik |
| Viskositas dinamik udara, $\mu$ (pada 30 $^0$C) | 1,872 10$^{-5}$ kg/ms |

**a. Koefisien Daya dan *Tip Speed Ratio* (TSR)**

Data kecepatan angin (U) di tabel 4.1 diambil dari kecepatan angin rata – rata selama 1 bulan penuh, yaitu 6,1 m/detik. Dari parameter tabel 4.1 dan tabel 4.2, maka didapatkan Bilangan Reynold (*Re*) berikut ini.

$$Re = = \frac{UD}{v} = \frac{6{,}1\ \frac{m}{detik}\ x\ 4\ m}{1{,}608\ x\ 10^{-5}\ \frac{m^2}{detik}} = 1.500.000 \qquad (4.1)$$




**Gambar 4.4.** Koefisien daya $C_p$ versus *Tip Speed Ratio* ($\lambda$) pada turbin angin dengan *airfoil* NREL S816 di pesisir Gampong Alue Naga

Koefisien daya ($C_p$) dan *Tip Speed Ratio* (TSR) $\lambda$ diperoleh dari hasil simulasi menggunakan *Q-Blade* dan ditunjukkan pada gambar 4.6 di atas. Nilai $\lambda$ yang diambil adalah nilai $\lambda$ maksimum, yaitu 5,8 sehingga didapatkan $C_{p(maks)}$ sebesar 0,41. Oleh karena itu, didapatkan kecepatan angular sudu turbin $\Omega$ berikut ini:

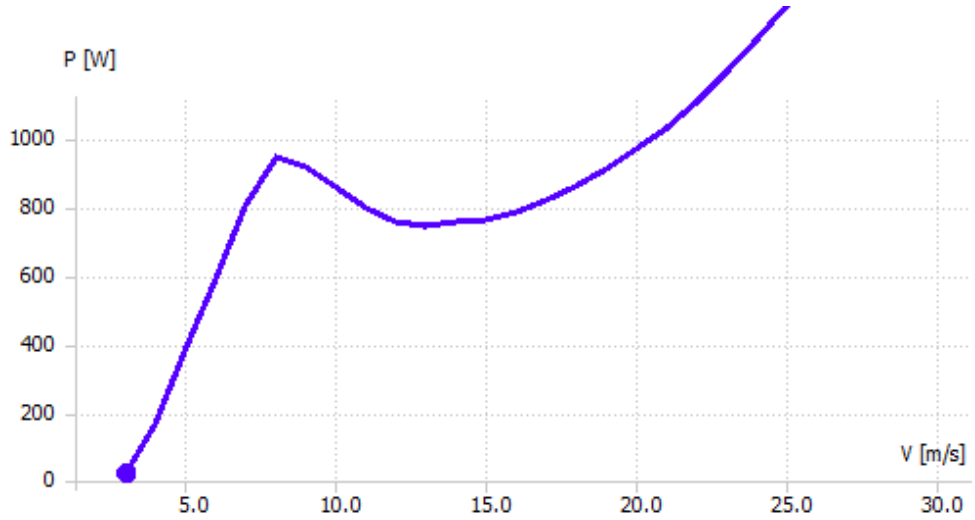
$$\Omega = \frac{\lambda x\ U}{R} = \frac{5{,}8\ x\ 6{,}1\ \frac{m}{detik}}{2\ m} = 17{,}69\ rad/s \qquad (4.2)$$

dan putaran *rotor* turbin *N* (RPM) berikut ini:

$$N = \frac{60\ detik\ x\ \Omega}{2\pi} = \frac{60\ detik\ x\ 17{,}69}{2\pi} = 169\ RPM \qquad (4.3)$$

**b. Luaran Daya Hasil Simulasi**

Hasil simulasi juga memperlihatkan luaran daya listrik yang dihasilkan yang ditunjukkan pada grafik berikut ini.




**Gambar 4.5.** Daya (*P*) versus kecepatan angin (*U*) pada turbin angin dengan *airfoil* NREL S816 di pesisir Gampong Alue Naga

Berdasarkan hasil simulasi diperoleh bahwa *rotor* turbin dengan *airfoil* NREL S816 akan mulai berputar pada kecepatan angin 3 m/s sebagai nilai *cut in speed*, yaitu kecepatan awal yang dapat membuat *rotor* mulai berputar, dengan daya yang dihasilkan mulai dari 20 watt. Dengan kecepatan angin rata – rata di Pesisir Alue Naga sebesar 6,1 m/detik dan putaran turbin sebanyak 169 RPM, maka daya listrik luaran yang dihasilkan adalah sebesar 610 Watt per turbin. Turbin akan menghasilkan daya maksimum pada kecepatan angin sebesar 8 m/s dengan taksiran daya yang dihasilkan sebesar 940 Watt. Selanjutnya, batas kecepatan maksimal untuk berputarnya rotor, yang kemudian disebut *cut out speed* berada pada kecepatan 20,6 m/s. Pada kondisi ini, turbin akan berputar secara berlebih sehingga akan menimbulkan berbagai dampak negatif seperti *over*

*heat* (panas berlebih) pada *rotor*, *rotor breakdown*, dan arus berlebih yang mengalir ke generator sehingga harus dikendalikan dengan sistem *yawing* dan *furling*. Idealnya, turbin angin dirancang dengan *cut in speed* yang seminimal mungkin, kecepatan nominal yang sesuai dengan potensi angin lokal, dan *cut out speed* yang semaksimal mungkin. Namun secara mekanik kondisi ini sulit diwujudkan karena kompensasi dari perancangan turbin angin dengan nilai kecepatan maksimal ($V_{cut\ out}$) yang besar adalah $V_{cut}$ dan $V_{rated}$ yang relatif akan besar pula.

**c. Luaran Daya Hasil Perhitungan Manual**

Menghitung daya angin secara manual dapat dilakukan dengan mengasumsikan $C_p$ maksimum, yaitu sebesar 16/27. Kecepatan angin (U) didapat dari kecepatan angin rata – rata di Pesisir Alue Naga dari total 30 hari pengambilan data kecepatan angin, yaitu 6,1 m/s. Dengan asumsi efisiensi generator ±60%, maka hasil perhitungan daya turbin angin $P_T$ di Pesisir Alue Naga adalah sebagai berikut:

$$P_T = \frac{1}{2}.\rho.C_p.\eta_{Gen}A.U^3 \qquad (4.4)$$

$$P_T = \frac{1}{2}.1{,}164.\frac{16}{27}.60\%.\ 12{,}56.\ 6{,}1^3 = 590\ Watt$$

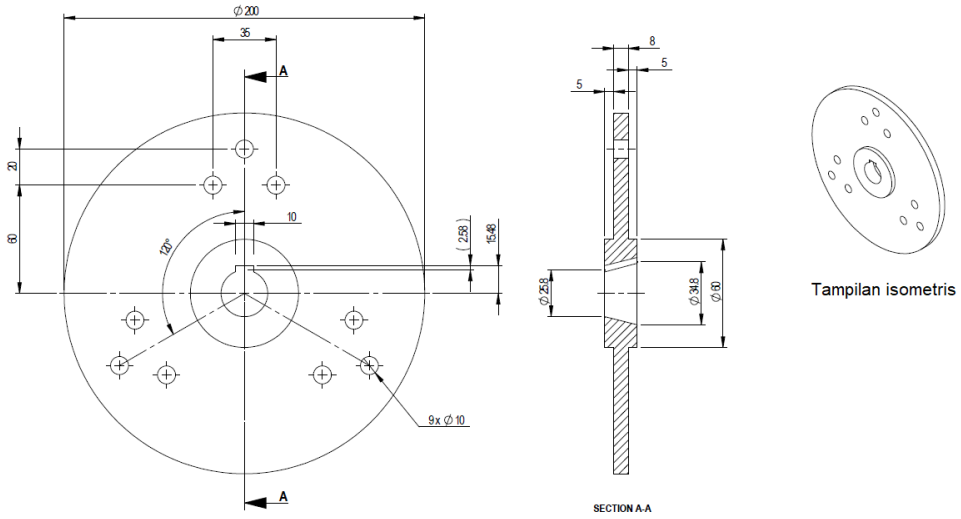
Berdasarkan perhitungan di atas dapat dilihat bahwa daya yang dihasilkan dari perhitungan secara teori sebesar 590 Watt memiliki nilai yang tidak jauh berbeda dengan hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak *Q-Blade* yaitu sebesar 610 Watt.

### 4.2.2. *Hub*

Sebuah aplikasi *SolidWork* 3 dimensi dapat digunakan untuk merancang *hub* dengan menggunakan pedoman standar. *Hub* dibuat dari bahan baja tahan karat untuk mencegah terjadinya reaksi oksidasi dan korosi yang dapat merusak *hub*.

Pelat *hub* dibuat setebal 20 mm dengan diameter sebesar 200 mm yang melalui proses permesinan sehingga memungkinkan untuk dipasangi *blade*. Lubang-lubang baut untuk memasang *rotor blade* dimasukkan sesuai spesifikasi sudu turbin. Rincian desain *hub* ditunjukkan pada gambar berikut.

| ITEM NO | JUMLAH | DESKRPISI | UKURAN | BAHAN |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | Plat tebal 20 mm | Dia. 200 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |




**Gambar 4.6.** Rincian desain *hub*

*Sumber: Strong, S. J., 2008*

*Hub* terdiri dari dua pelat baja yang di beri baut bersama untuk menahan sudu turbin. Pelat *hub* bagian belakang diberi baut ke poros yang menahan 3 sudu turbin. Pola tiga baut digunakan untuk memasang ketiga bilah sudu turbin pada *hub*.

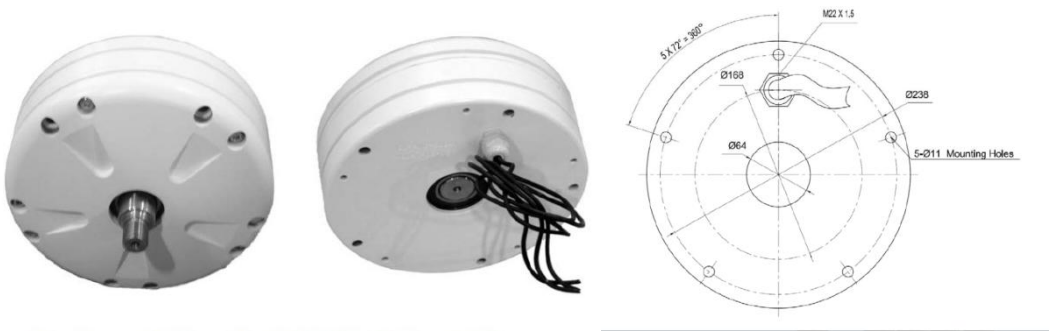
### 4.2.3. Generator

Generator yang digunakan sebagai konversi tenaga kinetik yang dihasilkan oleh tenaga angin pada sistem turbin angin di Pesisir Alue Naga merupakan generator AC (*Alternative Current*) 3 fasa. Pemilihan menggunakan generator AC 3 fasa ini karena generator 3 fasa memiliki daya output yang lebih besar dengan dimensi ukuran fisik yang lebih kecil.

Generator pada sistem turbin angin di Pesisir Alue Naga menggunakan generator magnet permanen (GMP) dengan putaran rendah. Spesifikasi generator

yang digunakan mempunyai nilai daya keluar sebesar 1 kW dan nilai tegangan yang keluar harus berada pada kisaran 12, 24, atau 48 volt. Generator yang digunakan ini juga mempunyai keluaran 3 fasa tanpa fasa netral. Dari keluaran tersebut dapat disambungkan dengan beban. Generator GMP dipilih karena merupakan generator yang dirancang khusus supaya dapat berfungsi pada kecepatan sudut atau angular yang rendah.

Generator yang digunakan untuk desain ini adalah GMP yang diproduksi oleh produsen Tiongkok, Ginlong, yaitu model GL-PMG-1000 dengan luaran daya maksimum 1000 W dan dengan putaran dapat mencapai 440 RPM. Pemilihan generator ini memungkinkan pengguna di lokasi kecepatan angin rata-rata yang rendah. *Casing* generator terbuat dari bahan aluminium dan dilapisi dengan cat sebagai lapisan pelindung dari korosi dan oksidasi. Bentuk generator tersebut dapat dilihat pada gambar berikut.




**Gambar 4.7.** Bentuk dan gambar desain generator GMP 1 kW GL-PMG-1000 yang diproduksi oleh Ginlong, Tiongkok

*Sumber: Strong, S. J., 2008*

### 4.2.4. Ekor

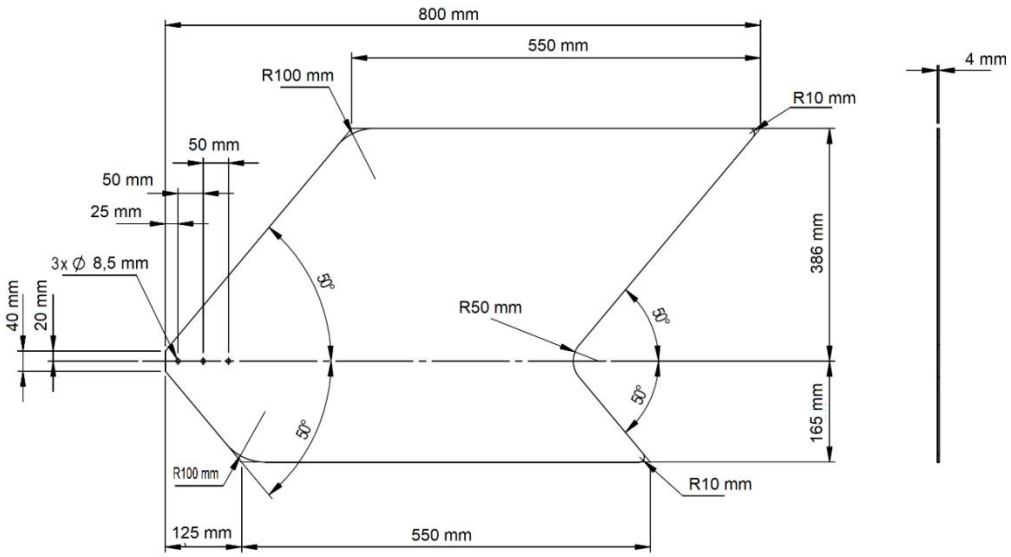
Ekor turbin dihubungkan ke badan turbin di puncak menara yang memungkinkan turbin berputar dengan lancar untuk mengikuti arah angin. Ekor dibuat dari bahan baja. Untuk mendapatkan fungsi ekor yang optimum, maka perlu dihitung luas areanya sehingga diperoleh luas area ekor sebagai berikut.

$$A_{daun\ ekor} = 0{,}04\ x\ A_{sapuan\ sudu\ turbin} \quad (5)$$

$$A_{daun\ ekor} = 0{,}04\ x\ \pi\ x\ r^2$$

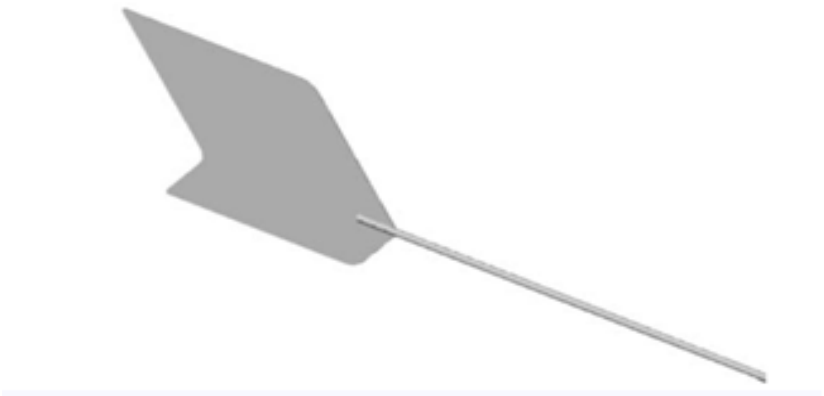
$$A_{daun\ ekor} = 0{,}04\ x\ \pi\ x\ 2^2 = 0{,}5\ m^2$$

Dengan luas daun ekor 0,5 $m^2$ pergerakan turbin sudah cukup baik untuk mengikuti arah angin. Rincian desain daun ekor ditunjukkan pada gambar-gambar di bawah ini.




**Gambar 4.8.** Rincian desain daun ekor

*Sumber: Strong, S. J., 2008*



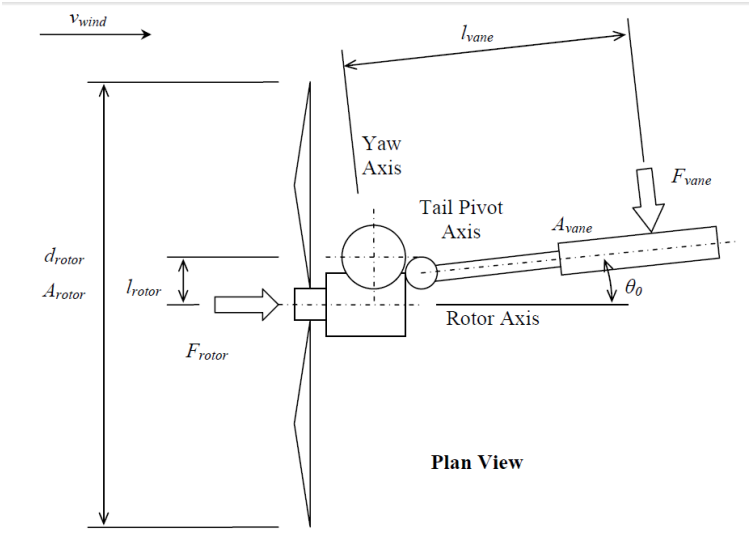
**Gambar 4.9.** Contoh desain ekor turbin menggunakan *software SolidWork*

*Sumber: Strong, S. J., 2008*

### 4.2.5. Mekanisme *Yawing* dan *Furling*

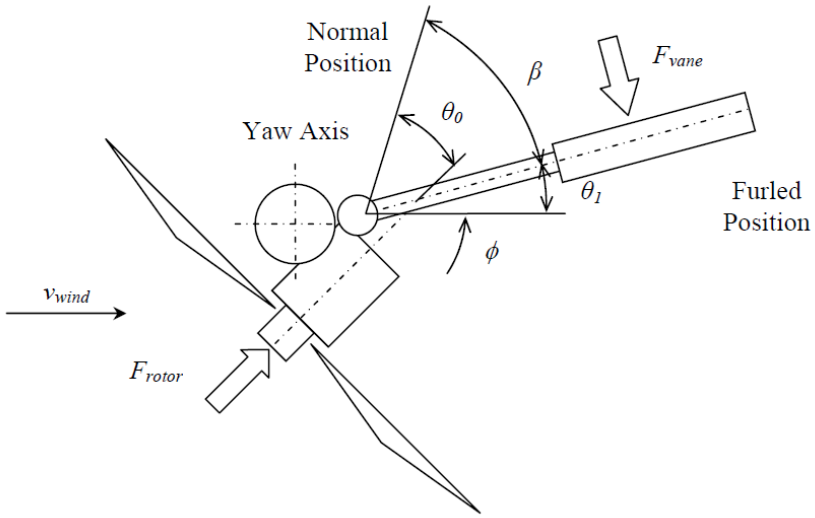
Mekanisme *yaw* merupakan komponen yang menghubungkan tiang penyangga dengan badan turbin. Mekanisme *yaw* berfungsi untuk mengatur arah *rotor* sehingga *rotor* selalu menghadap ke arah datangnya angin. Material yang digunakan untuk membuat mekanisme *yaw* adalah baja. Baja mempunyai densitas besar sehingga lebih mampu menahan segala beban yang diterima mekanisme *yaw* dari proses operasi turbin angin, yaitu beban yang ditimbulkan oleh terpaan angin ditambah dengan beban dari berat turbin itu sendiri.

Bantalan *yaw* utama dan *pivot block* dirancang untuk mekanisme *furling*. Ekor membutuhkan tiang dan baling-baling untuk menangkap angin. Seluruh rakitan ini kemudian dipasang pada bagian atas menara.




**Gambar 4.10.** Mekanisme *yawing* dan *furling* turbin angin pada kondisi operasi normal

*Sumber: Strong, S. J., 2008*




**Gambar 4.11.** Mekanisme *yawing* dan *furling* turbin angin pada kondisi angin kecepatan tinggi

*Sumber: Strong, S. J., 2008*

Pada kondisi operasi normal, angin yang berhembus menerpa ekor turbin akan menyeimbangkan ekor supaya berada pada sudut $\theta_0$ dari arah angin sehingga *rotor* dapat tetap menghadap ke arah datangnya angin (gambar 4.10.). Pada saat kecepatan angin meningkat, gaya dorong angin terhadap ekor turbin lebih besar dari pada massa ekor turbin itu sendiri sehingga terjadi ketidakseimbangan gaya pada kedua sisi ekor. Hal ini akan menyebabkan *rotor* berputar dan tidak lagi tepat menghadap ke arah datangnya angin (gambar 4.11.).

### 4.2.6. Menara

Jenis menara yang digunakan pada turbin angin Alue Naga adalah menara tubular yang berdiri bebas tanpa penyangga. Menara tipe tubular lebih dipilih dari pada menara dengan tipe *guyed* atau *lattice* karena peningkatan kemudahan dan estetika struktur. Menara *lattice* secara inheren tidak aman, karena memungkinkan seseorang memanjat menara, dan lebih sulit untuk turun ke tanah untuk perawatan. Menara *guyed* membutuhkan kabel *guy* untuk menjangkar menara di beberapa titik di sekitar pangkalan. Hal ini berarti bahwa turbin angin skala kecil

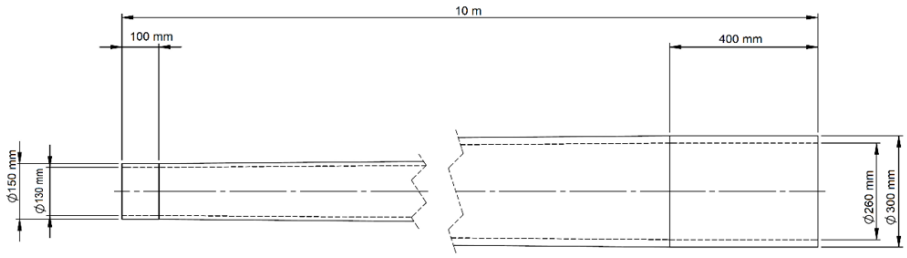
membutuhkan area tanah yang lebih besar. Sebuah menara yang berdiri bebas mengharuskan seluruh struktur diturunkan ke tanah untuk perawatan.

Desain awal membutuhkan ketinggian hub rotor 10 m dari permukaan tanah. Struktur yang berdiri bebas memiliki bentuk kerucut berongga, dengan diameter yang lebih besar dan ketebalan dinding yang lebih besar di pangkalan, meruncing ke diameter yang lebih kecil, ketebalan dinding yang lebih ringan di bagian atas. Menara akan dibuat dengan menggunakan bahan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) yang dilapisi dengan *gel-coat* untuk mencegah degradasi bahan GFRP akibat paparan sinar UV oleh matahari.

Pangkal menara GFRP akan ditahan oleh baja, dengan titik sumbu di dekat permukaan tanah. Untuk membantu proses pengangkatan ataupun penurunan menara dalam upaya perawatan, maka dirancang sebuah mekanisme berupa tiang *gin* (*gin pole*). Tiang *gin* merupakan alat yang digunakan sebagai tuas untuk membantu proses pengangkatan yang dibutuhkan bersama dengan pangkalan yang menyediakan titik untuk memutar menara saat mengangkat dan menurunkan menara. Menara dinaikkan dan diturunkan dengan menggunakan *winch manual* atau listrik yang melekat pada tiang *gin*.

Selama proses operasi normal, beban pada menara disebabkan oleh bobot mati turbin, gaya dorong rotor, dan kekuatan angin terhadap menara itu sendiri. Saat menaikkan atau menurunkan menara, berat menara juga akan menimbulkan momen lentur (*bending moment*) di pangkalan menara. Gaya yang disebabkan oleh angin pada menara dapat ditentukan dengan mengambil gaya rata-rata pada ketinggian setengah dari menara, dan kemudian mempertimbangkan hambatan aerodinamik pada menara, yang untuk kasus ini akan disederhanakan sebagai sebuah silinder panjang. Rincian desain menara dapat dilihat pada gambar berikut yang disertai dengan *pivot* untuk pemasangan *gin pole*.

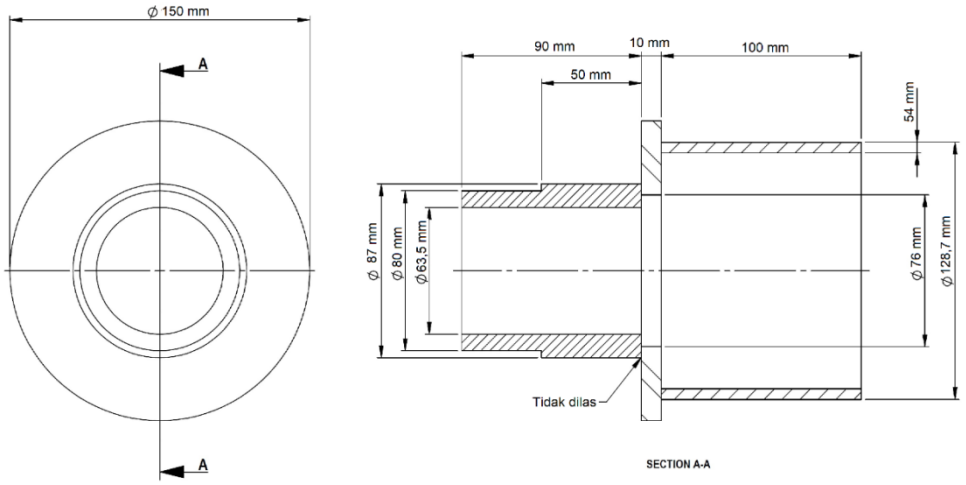
| | |
|---|---|
| Bahan | Glass Fibre Reinforced Polymer |
| Jumlah | 1 |
| Tinggi | 10 m |
| Diameter dasar | 300 mm |
| Diameter ujung | 150 mm |
| Lapisan luar | Gel coat |
| Massa | 248 kg |




**Gambar 4.12.** Rincian desain menara

*Sumber: Strong, S. J., 2008*

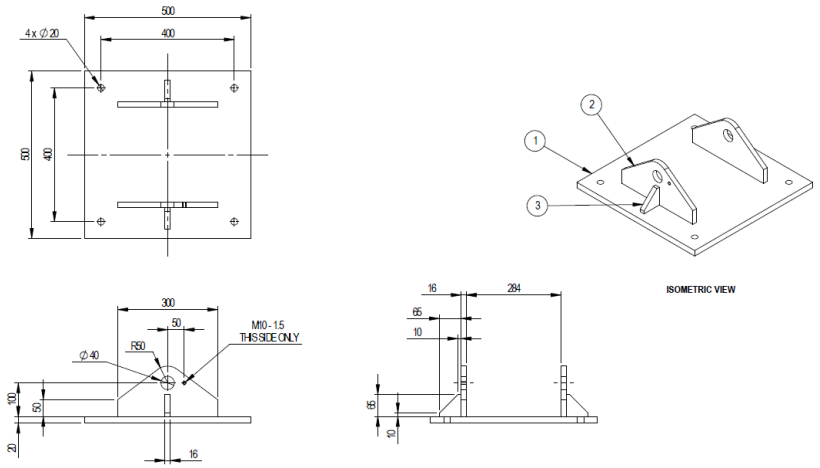
| ITEM NO | JUMLAH | DESKRPISI | UKURAN | BAHAN |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | Dia. 90 Round bar | 90 mm | Baja tahan karat Martensitik AISI 1020 |
| 2 | 1 | Plat tebal 10 mm | Dia. 164 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 3 | 1 | 128,7 mm x 5,4 mm dinding CHS | 100 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |




**Gambar 4.13.** Rincian desain poros atas menara

*Sumber: Strong, S. J., 2008*

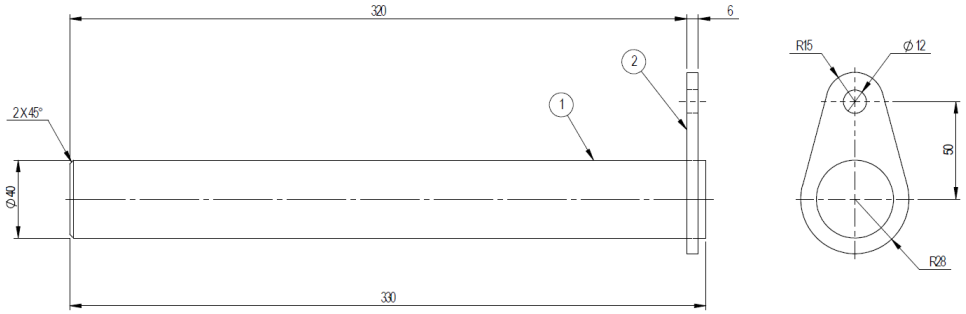
| ITEM NO | JUMLAH | DESKRPISI | UKURAN | BAHAN |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | Plat tebal 20 mm | 500 mm x 500 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 2 | 1 | Plat tebal 16 mm | 300 mm x 150 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 3 | 2 | Plat tebal 16 mm | 65 mm x 65 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 4 | 1 | Plat tebal 16 mm | 300 mm x 150 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |




**Gambar 4.14.** Rincian desain dasar sumbu letakan menara

*Sumber: Strong, S. J., 2008*

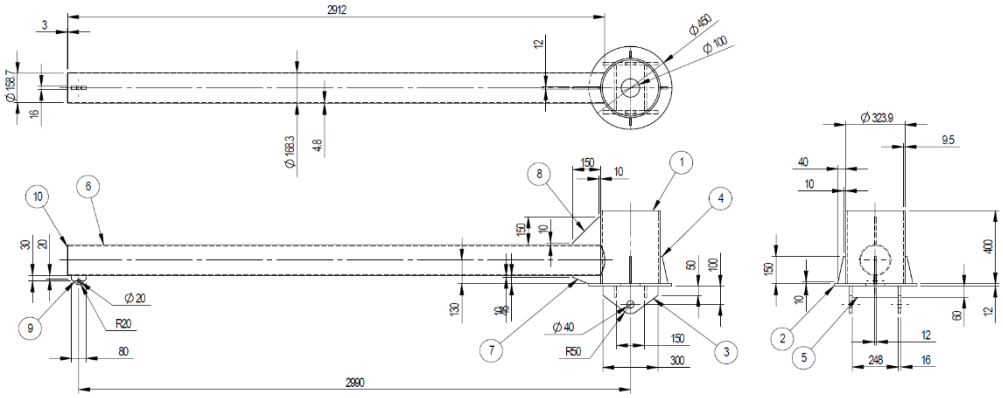
| ITEM NO | JUMLAH | DESKRPISI | UKURAN | BAHAN |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | Dia. 40 Round bar | 330 mm | Baja tahan karat Martensitik AISI 1020 |
| 2 | 1 | Plat tebal 6 mm | 93 mm x 56 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |




**Gambar 4.15.** Rincian desain pin dasar sumbu letakan menara

*Sumber: Strong, S. J., 2008*

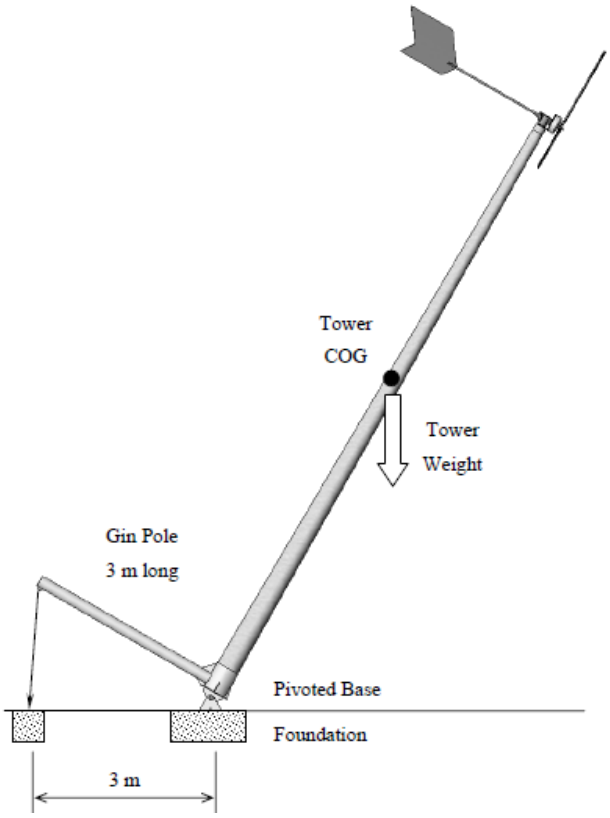
| ITEM NO | JUMLAH | DESKRPISI | UKURAN | BAHAN |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 323,9 mm x 9,5 mm dinding CHS | 400 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 2 | 1 | Plat tebal 12 mm | Dia. 450 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 3 | 2 | Plat tebal 16 mm | 300 mm x 150 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 4 | 3 | Plat tebal 12 mm | 150 mm x 40 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 5 | 2 | Plat tebal 12 mm | 248 mm x 60 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 6 | 1 | 168,3 mm x 4,8 mm dinding CHS | 3.050 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 7 | 1 | Plat tebal 12 mm | 150 mm x 46 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 8 | 1 | Plat tebal 12 mm | 150 mm x 150 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 9 | 1 | Plat tebal 16 mm | 80 mm x 50 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |
| 10 | 1 | Plat tebal 3 mm | Dia. 158,7 mm | Baja tahan karat Martensitik grade 250 |




**Gambar 4.16.** Rincian desain tiang letakan menara

*Sumber: Strong, S. J., 2008*

Berikut ini diperlihatkan bagaimana bentuk pondasi dermaga untuk turbin angin kecil, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.17. Menara dihubungkan ke pondasi oleh sekrup. Sebagian besar produsen untuk generator kecil yang memiliki karakteristik serupa menggunakan jenis pondasi seperti ini sehingga untuk proyek ini juga dipilih solusi yang sama (Landsea, 2005).




**Gambar 4.17.** Penurunan menara selama angin berkecepatan tinggi.

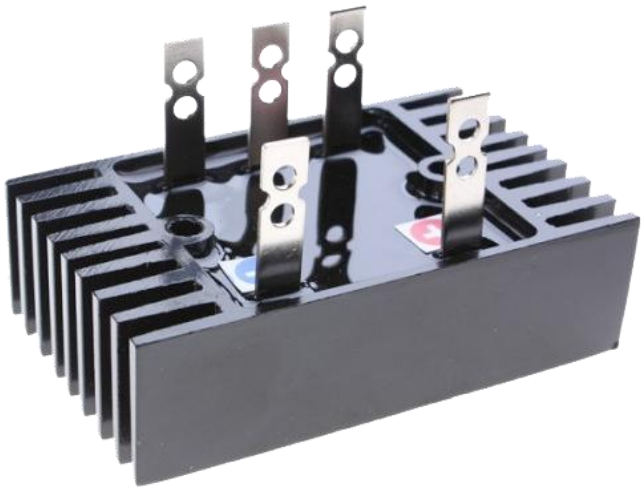
*Sumber: Strong, S. J., 2008*

*Gin pole* dibuat dengan panjang 3 meter dan selama masa operasi akan dijangkarkan pada bagian pondasi tiang. Jangkar dapat dibuka bila sewaktu-waktu dilakukan perawatan turbin sehingga turbin dapat dinaik-turunkan sesuai dengan keperluan seperti yang terlihat pada gambar di atas.

### 4.2.7. Sistem Kontrol

Sistem kontrol diperlukan untuk mengatur proses peyimpanan energi listrik yang telah dihasilkan oleh generator pada puncak menara turbin angin untuk kemudian ditransmisikan dan disimpan pada baterai yang berada pada dasar menara. Sistem kontroler turbin angin ini terdiri atas *rectifier* dan kontak relay. Karena arus listrik yang dihasilkan oleh generator berupa arus AC, maka perlu diubah menjadi arus DC terlebih dahulu supaya dapat disimpan di dalam baterai. Penyearah (*rectifier*) tiga fasa digunakan untuk menyearahkan gelombang

tegangan *output* generator turbin angin yang berupa gelombang tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan DC. Berikut adalah contoh gambar *rectifier* yang akan digunakan pada sistem turbin angin Alue Naga.



**Gambar 4.18.** *Three phase bridge rectifier* untuk mengubah arus AC menjadi arus DC pada turbin angin

*Sumber: https://www.bimblesolar.com/digital-voltage-relay*

*Rectifier* tersebut akan mengubah arus yang dihasilkan oleh generator yang akan digunakan yaitu GL-PMG-1000 yang berupa arus AC untuk diubah menjadi arus DC untuk kemudian disimpan di dalam baterai.

Sementara kontak relay berfungsi sebagai penghubung antara generator dengan sistem kontroler. Kontak *relay* yang digunakan adalah *Digital Voltage Sensing Relay* 10 A yang secara otomatis akan terhubung ke generator. Generator akan dihubungkan ke sistem jika kecepatan angin pada turbin angin lebih dari 3m/s dan jika dibawah itu maka generator tidak dihubungkan dengan sistem mengingat *cut in speed* turbin angin sebesar 3,5 m/s. Kontak *relay* yang akan digunakan dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

**Gambar 4.19.** *Digital voltage sensing relay* 10 A
*Sumber: https://www.bimblesolar.com/digital-voltage-relay*

Kontak *relay* ini memiliki rentang daya yang cukup luas yaitu dari 0 sampai 99,9 volt sehingga memungkinkan digunakan mengingat daya yang dihasilkan akan tidak selalu sama dikarenakan kecepatan angin yang fluktuatif.

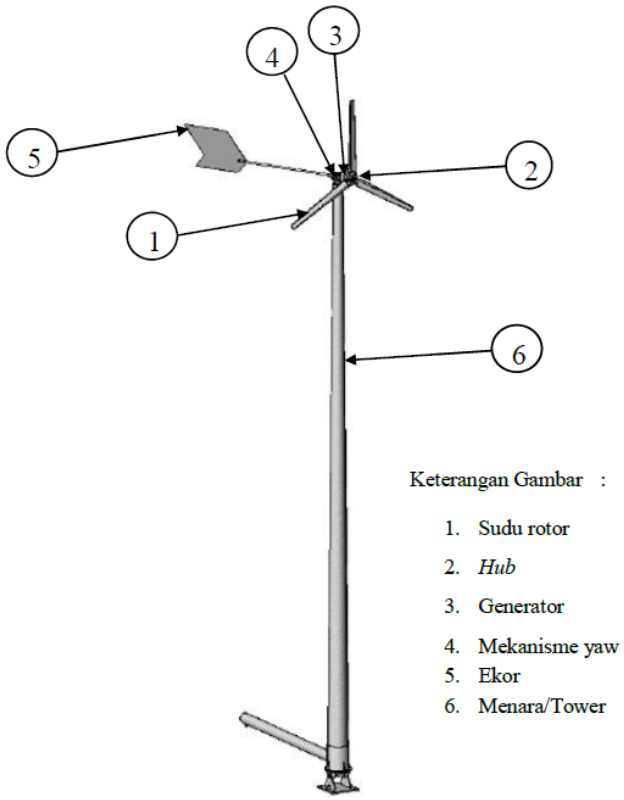
### 4.2.8. Penyimpanan Daya

Pada sebuah sistem konversi energi angin yaitu turbin angin terkadang menggunakan baterai sebagai alat penyimpanan daya yang dihasilkan. Baterai yang akan digunakan pada sistem turbin angin Alue Naga adalah baterai *deep cycle* (*deep cycle battery*) karena baterai ini mampu menahan siklus pengisian dan pelepasan arus listrik yang berulang-ulang dan konstan. Baterai ini dapat menghasilkan energi yang stabil dan dalam waktu yang lama. Baterai ini dapat digunakan hingga 80% dari kapasitas nominalnya sehingga kapasitas energi yang dapat digunakan lebih besar tanpa harus merusak dan mengurangi umur kerja baterai. Bentuk baterai yang akan digunakan dapat dilihat pada gambar berikut.

**Gambar 4.20.** Koyama *deep cycle battery* DC100-12 dengan spesifikasi 12V 100Ah

Sumber: https://cbbbattery.en.made-in-china.com/

Komponen desain sistem turbin angin di Pesisir Alue Naga secara keseluruhan ditunjukkan di gambar 4.21. Rangkuman spesifikasi desain turbin angin Alue Naga secara keseluruhan ditunjukkan di tabel 4.3.




**Gambar 4.21.** Komponen desain sistem turbin angin di Alue Naga, Kota Banda Aceh

*Sumber: Strong, S. J., 2008*

**Table 4.3.** Spesifikasi desain turbin angin Alue Naga, Kota Banda Aceh

| | |
|---|---|
| Model | Alue Naga 1000 W |
| Asal | Banda Aceh |
| **Daya** | |
| Daya yang dihasilkan di simulasi (W) | 610 |
| Daya maksimum (W) | 940 |
| **Kecepatan Angin** | |
| Nilai kecepatan angin normal (m/s) | 6,1 |
| Batas kecepatan angin terendah (m/s) | 3,5 |
| Batas kecepatan angin tertinggi (m/s) | 20 |
| **Kecepatan Sudu Turbin** | |
| *Tip speed ratio* | 5,8 |

| | |
|---|---|
| Nilai kecepatan rotor normal (RPM) | 169 |
| Kecepatan angular (rad/s) | 17,69 |
| **Sudu Turbin** | |
| Jumlah sudu | 3 |
| Diameter (m) | 4 |
| Luasan area sapuan rotor turbin ($m^2$) | 12,56 |
| Material pembuatan sudu turbin | GFRP |
| **Generator** | |
| Tipe | Ginlong 1 kW GL-PMG-1000 |
| Tengangan yang dihasilkan (*V*) | 48 V AC |
| Jumlah fasa | 3 |
| Kontrol daya | *Furling* otomatis |
| Cincin selip kabel | Ada |
| Sistem orientasi | *Yawing* dan daun ekor |
| Sistem rem | Tidak ada |
| *Controller* | Ada |
| **Sistem Penyimpanan Daya** | |
| Jenis baterai | *Deep cycle battery* |
| Spesifikasi | 12V 100Ah |
| **Menara** | |
| Tipe | *Free-standing* (tubular) |
| Material pembuatan menara | GFRP |
| Ketinggian menara (m) | 10 |

# BAB V
# PENUTUP

## 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Kriteria awal desain turbin angin 1000 Watt Gampong Alue Naga didesain dengan diameter *rotor* 4m, putaran *rotor* 169 RPM dengan daya *output* 590 Watt yang dihasilkan oleh generator Ginlong 1 kW GL-PMG-1000, sistem orientasi arah angin menggunakan ekor dan mekanisme *yawing*, sistem pengaman dengan *furling*, sistem kontrol dan penyimpanan daya dengan baterai *deep cycle*, dan menara tubular setinggi 10m.
2. Hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak *Q-Blade* menunjukkan bahwa rancangan rotor turbin angin mampu menghasilkan daya (*output power*) maksimum sebesar 940 Watt pada kecepatan angin 8 m/s sedangkan daya yang dihasilkan pada kecepatan angin rata-rata sebesar 6,1 m/s adalah sebesar 610 Watt.

## 5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut.

1. Dilakukan penelitian dan pengembangan lebih lanjut mengenai *prototype* turbin angin hasil penelitan ini agar diperoleh desain yang lengkap dan dapat diaplikasikan untuk energi berkelanjutan kota Banda Aceh sehingga dapat membantu meningkatkan *share* pemanfaatan energi terbarukan di Banda Aceh dan mendukung program unggulan Pemerintah Aceh, ‘Aceh Energi’.

# DAFTAR PUSTAKA

Adlie, T. A., Rizal, T. A., dan Arjuanda. (2015). Perancangan Turbin Angin Sumbu Horizontal 3 Sudu dengan Daya *Output* 1 KW. *Jurnal Ilmiah Jurutera*. 2 (2). 72 – 78.

Astra, M. I. (2010). Energi dan Dampaknya terhadap Lingkungan. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika.* 11 (2). Hal: 131 – 139.

Aye, Z. Z., Shwe, K. K. (2019). Wind Turbine Design and Simulation with Q Blade. *International Journal of Research Publications.* 20 (1). *Available online at* www.ijrp.org

Bachtiar, A. dan Hayattul, W. (2018). Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin PT. Lentera Angin Nusantara (LAN) Ciheras. Jurnal Teknik Elektro. 7 (1). 35 – 45.

Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2005-2025 oleh Mentri Energi dan Sumber Daya Mineral.

Budiyanto, F., Mustaqim, dan Wibowo, H. (2014). Generator Turbin Angin Putaran Rendah. 9 (2). Tegal: Universitas Pancasakti Tegal.

Elinur, Priyarsono, D. S., Tambunan, M., dan Firdaus, M. (2010). Perkembangan Konsumsi dan Penyediaan Energi dalam Perekonomian Indonesia. *Indonesian Journal of Agricultural Economics.* 2 (1). 97 – 119.

Gay, D., Hoa, S., Tsai, S. (2003). *Composite Materials: Desain and Application.* Florida, USA: CRC Press.

Hafiz, M. (2013). *Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Angin Sistem Terapung di Lepas Pantai Alue Naga*. Skripsi. Banda Aceh: Universitas Syiah Kuala.

Hapsoro, R. A. (2016). *Optimasi Jarak Antar Tumpuan pada Menara Turbin Angin Sumbu Horizontal Rangka Batang Baja Tinggi 30 M*. Skripsi. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.

Hefei Sunway Power Co. Ltd, Agustus 2019, http://sunwaypower.en.alibaba.com/

Hutapea, Maritje. (2017). *Potensi Bisnis Energi Baru Terbarukan*. Direktur Aneka Energi Baaru dan Energi Terbarukan. Jakarta: KESDM.

https://cbbbattery.en.made-in-china.com/ diakses online pada Januari 2020.

Ismail, Arrahman, T. (2017). Perancangan Turbin Angin Sumbu Horizontal Tiga Sudu dengan Kapasitas 3 MW. *Presisi*. 18 (2). 10 – 19.

Jaelani, A. (2017). *Kebijakan Energi Baru Terbarukan di Indonesia: Isyarat Ilmiah Al-Qur'an dan Implementasinya dalam Ekonomi Islam*. Fakultas Syari'ah dan Ekonomi Islam. IAIN Syekh Nurjati Cirebon.

Landsea C. (2005). Extracts from an open letter to the scientific community from Chris Landsea. *Energy and Environment.* Vol 16, pp. 355 – 356. Brentwood, Essex, United Kingdom: Multi Science Publishing Co. Ltd.

Mohammadi, M., Mohammadi, A., Mohammadi, M., Minaei, H. N. (2016). Opimization of Small Scale Wind Turine Blades for Low Speed Conditions. *Journal of Clean Energy Technologies.*4 (2). 140 – 143.

Musyafa', A. (2012). *Rancang Bangun Kontrol Logika Fuzzy pada Sudut Angguk Turbin Angin untuk Optimisasi Daya Listrik di Ladang Angin Jawa Timur – Indonesia*. Disertasi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November.

Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional.

Peta Potensi Energi Nasional, Provinsi Aceh tahun 2004. DJLPE.

Purusothaman, M., Valarmathi, T. N., Reddy, S. P. (2016). Selection of Twist and Chord Distribution of Horizontal Axis Win Turbine in Low Wind Conditions. *IOP Conf. Series: Material Science and Engineering*. Doi: 10.1088/1757-899X/149/1/012203.

Saputra, M. (2016). Kajian Literatur Sudu Turbin Angin untuk Skala Kecepatan Angin Rendah. *Jurnal Mekanova*. 2 (1). 74 – 83.

Southwest Windpower, "Air X Land Manual, Document #0056 REV D", 2002.

Strong, S. J. (2008). *Design of A Small Wind Turbine*. Dissertation. Australia: University of Southern Queensland.

Suresh, A. and Rajakumar, S. 2019. Design of Small Horizontal Axis Wind Turbine for Low Wind Speed Rural Applications. *Materials Today: Proceedings.* Page: 1 – 5.

Widyanto, S.W., Wisnugroho, S., dan Agus, M. (2018). *Pemanfaatan Tenaga Angin sebagai Pelapis Energi Surya pada Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid di Pulau Wangi-Wangi*. Seminar Nasional Sains dan Teknologi. Jakarta: Universitas Muhammadiyah Jakarta.

Zulkarnain. (2016). Desain dan Analisis Struktur Menara *Lattice* Pembangkit Listrik Tenaga Angin 100 kW di Desa Tamanjaya, Sukabumi, Jawa Barat. *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*. 15 (1). 21 – 32.

# Lampiran A - Data Generator GMP Ginlong

## *Wind Turbine Permanent Magnet Generator/Alternator*
## *Ginlong Technologies GL-PMG-1000*

*World Leading Professional Wind Turbine Parts Supplier*

GINLONG

### *Features*

* *Low start up speed due to low cogging and resistive torque design.*
* *Gearless, direct drive, low RPM generator.*
* *High standard, quality components for use in harsh and extreme environments for wind turbines.*
* *High efficiency and Low mechanical resistance energy loss.*
* *Excellent heat dissipation due to the Aluminiumalloy outer frame and special internal structure.*
* *High strength from the specially design structure and fully heat treatment Aluminium.*
* *Generator is designed using specially selected material and treated to resist corrosion and oxidation.*
* *Designed for reliable and long operational life time under long-term full output.*
* *Designed for 20-year operation life.*
* *Patent protected design.*

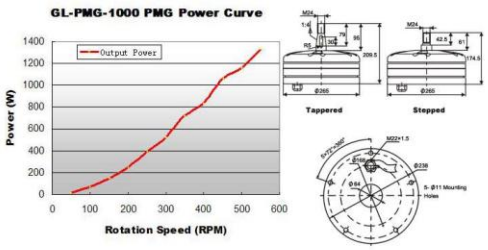
### *Main Specifications*

* Outer frame material High standard Aluminium alloy with TF/T6 heat treatment.
* Outer frame finish Aluminium surface is anodised then power painted for anti-corrosion protection.
* Shaft material High standard Stainless Steel.
* Shaft bearing High standard SKF or NSK bearings.
* Fasteners (nuts and bolts) High standard Stainless Steel.
* Lamination stack High specification cold-rolled Steel.
* Windings temperature rating 180 degrees Celsius.
* Magnet material NdFeB (Neodymium Iron Boron).
* Magnets temperature rating 150 degrees Celsius.
* Generator configuration 3 Phase star connected AC output.
* Safety capable if withstanding short term shorting of the windings for braking effect at rated rotation speed.Class 1 electrical safety rated for prevention of electrical shocks.

### *High Quality and Reliable Product*

We have an extremely strict quality control procedure. Although we offer world class design and quality in our products, our price is still extremely competitive globally. We warmly welcome you to contact us to discuss about your product and design and allow us to answer any questions you may have.

### *Power Curve & Dimensions*




### *Modern Manufacture & Strict QC*

We have some of the latest and most advanced tools, equipment and machines at our disposal along with the modern computers and newest software packages backed up with years of design experience.

We have successfully producing over thousands of PMGs to European and American customers.

### *Research & Development*

Where we differ from traditional manufacturing companies is our very strong research and development ability. Our R&D team consists of several Ph.D. holders and industry experts to spear head the team. They all have many years of experience in their respective areas of research and expertise which is crucial to the solving of the clients R&D and production problems, some of it resulting in new patents for the company in order to protect the product and design.

GINLONG

Ningbo Ginlong Technologies Co., Ltd.

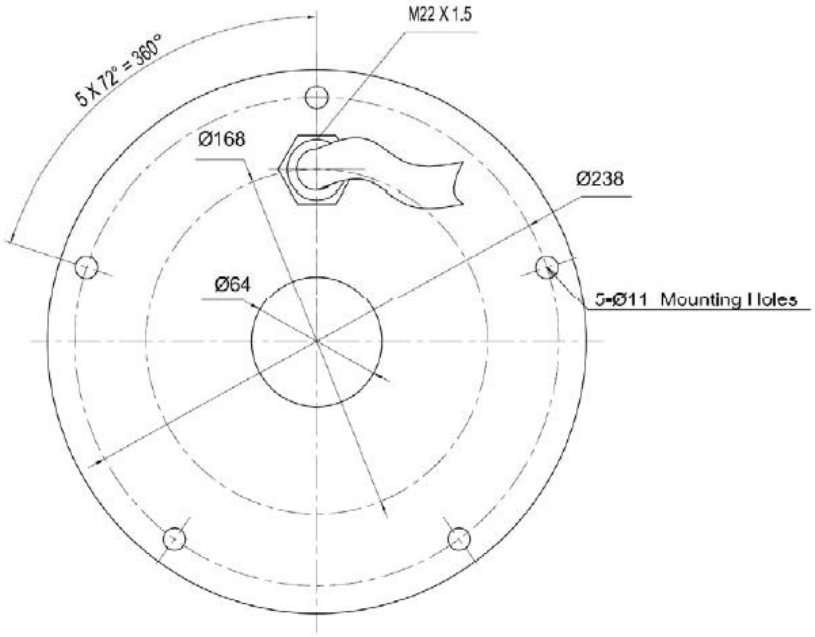
No. 305 Penglai Road, Xiangshan Industrial Estate, Dancheng, Xiangshan, Ningbo, Zhejiang, 315700, P.R.China

URL: www.ginlong.com
Email: info@ginlong.com

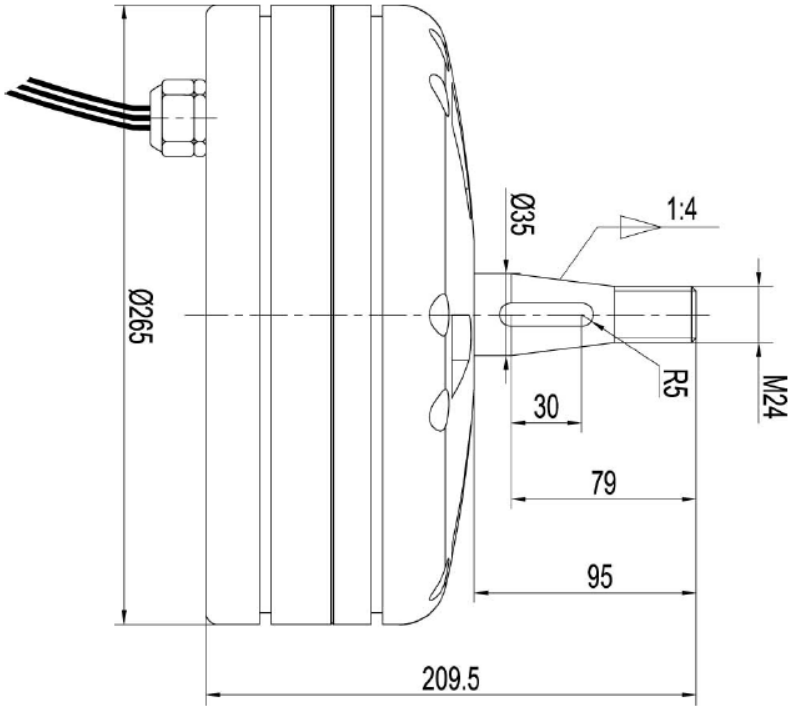
Tel: (+86) 574 6578 1806
Fax: (+86) 574 6578 1606

Published by Ginlong Technologies. Copyright 2006 Ginlong Technologies. All rights reserved.

**Gambar A.1.** Spesifikasi generator Ginlong kapasitas 1000 W tipe 1 kW GL-PMG-1000

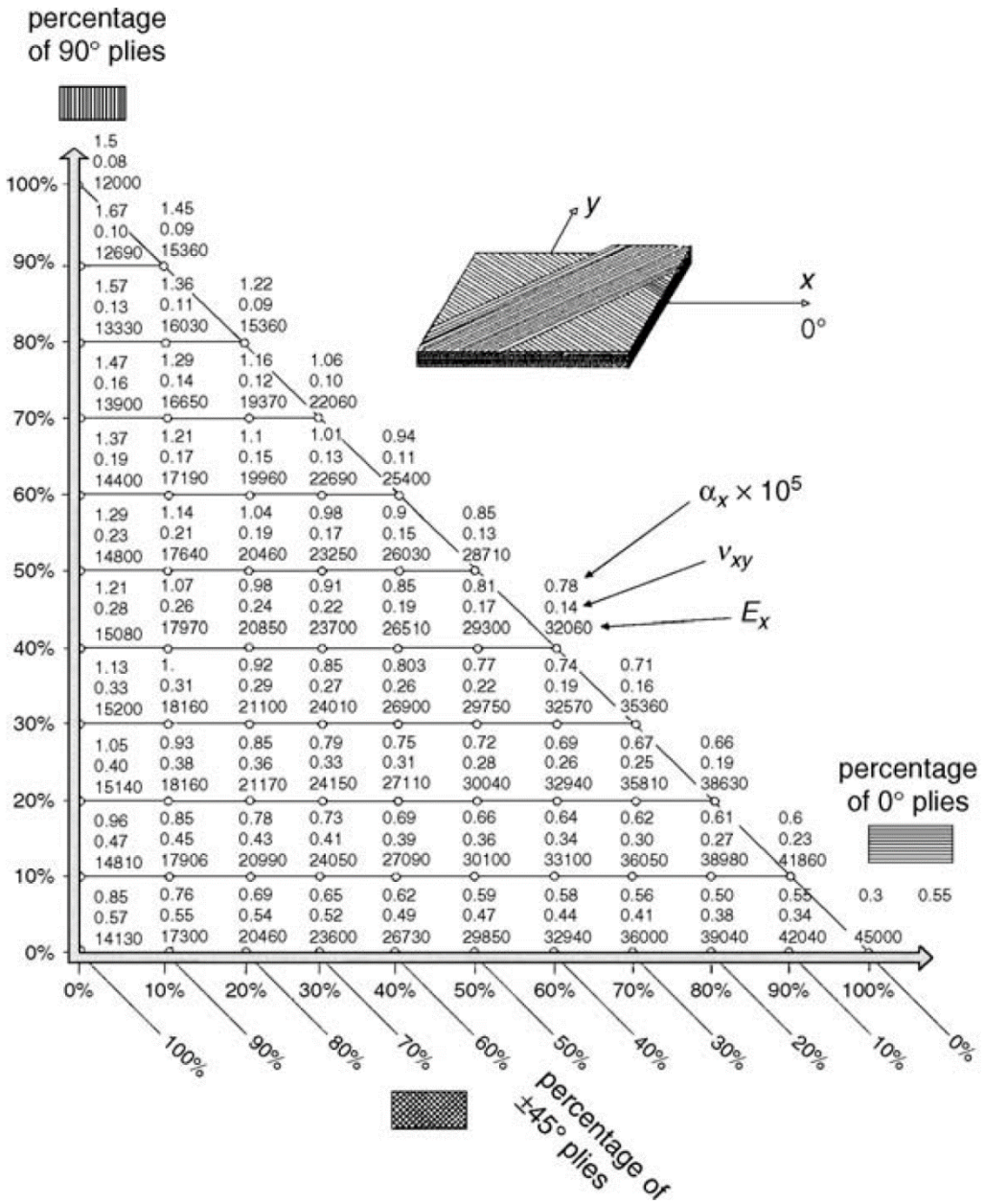



**Gambar A.2.** Rincian pemasangan generator Ginlong kapasitas 1000 W tipe 1 kW GL-PMG-1000

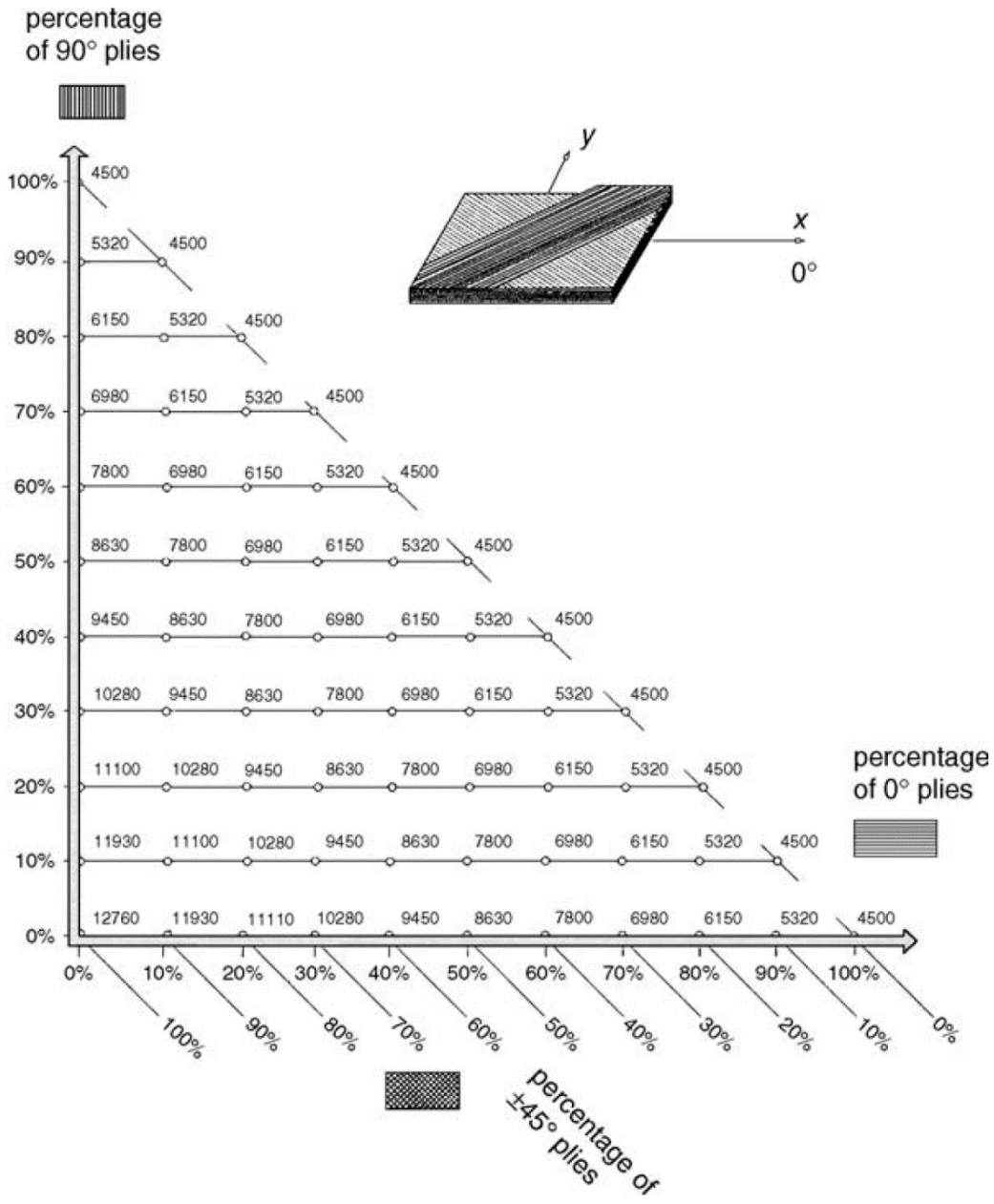



**Gambar A.3.** Rincian poros generator Ginlong kapasitas 1000 W tipe 1 kW GL-PMG-1000A

## Lampiran B – Sifat Elastisitas Bahan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP)




**Gambar B.1.** Modulus longitudinal $E_x$ (MPa), rasio Poisson $\upsilon_{xy}$, dan koefisien ekspansi termal $\alpha_x$, sebagai fungsi dari persentase lapisan dalam arah 0°, 90°, +45° dan -45°
*Sumber: Gay, dkk., 2003*




**Gambar B.2.** Modulus geser, Gxy (MPa) sebagai fungsi lapisan persentase dalam arah 0°, 90°, +45° dan -45°
*Sumber: Gay, dkk., 2003*

*ISSN :*

**TIM PENYUSUN**

DESAIN AWAL TURBIN ANGIN LEPAS PANTAI DI GAMPONG ALUE NAGA KOTA BANDA ACEH

1. Ir. Gusmeri , MT
2. Dr. Azhar Amsal, S.Pd, M.Pd
3. Nila Herawati, SE, M.Si
4. Parmakope, SE, MM
5. Eriawati, S.Pd.I.M.Pd
6. Adian Aristia Anas, ST, M. Sc
7. Zainuddin, ST
8. Raihan Rani
9. Cut Ali Akbar

**Dilarang mengumumkan, mendistribusikan , mengkomunikasikan, dan/atau menggandakan sebagian atau seluruh isi buku ini untuk tujuan komersial tanpa izin tertulis dari Badan Perencanaan Pembangunan Daerah**