

PERANCANGAN TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL TIGA SUDU DENGAN KAPASITAS 3 MW

Ismail¹, Taufik Arrahman²

¹ Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila Srengseng Sawah, Jagakarsa
Jakarta 12640, Indonesia

² Mahasiswa Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila Srengseng Sawah, Jagakarsa –
Jakarta 12640, Indonesia

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk memanfaatkan energi angin yang ada di Indonesia dan bertujuan untuk merancang turbin angin dengan kapasitas 3 MW menggunakan potensi energi angin yang ada di Indonesia, pada ketinggian 110 m di atas permukaan tanah untuk kecepatan angin rata – rata sebesar 7,53 m/s. Metode perancangan yang digunakan dengan cara analisis perhitungan numerik dan simulasi menggunakan *software* Q-Blade. *Software* Q-Blade digunakan untuk melengkapi hasil analisis perhitungan numerik. Hasil rancangan turbin angin ini menggunakan rata – rata kecepatan angin 7,5 m/s pada ketinggian 110 m. Rotor turbin angin ini memiliki diameter 170 m dengan *swept area* 22707,143 m² serta kecepatan putar 7,62 rpm. Rotor ini menggunakan jenis *airfoil* NREL S818 untuk bagian *root*, S825 untuk bagian *primary*, dan S822 untuk bagian *tip* dengan tiap bagian *airfoil* ini dibagi menjadi 9 segmen dengan masing – masing jarak tiap segmen (*r*) adalah 9,375 m. Hasil simulasi menggunakan Q-Blade adalah sudut *pitch* rotor sebesar 2,95° dengan kecepatan angin *cut in* sebesar 3 m/s dengan daya yang didapat sebesar 3007,07 kW. Generator yang dipilih memiliki kecepatan putar 365 rpm. *Gearbox* yang dipilih memiliki rasio 50 dengan transmisi roda gigi jenis *planetary 2-stage*. Hasil rancangan ini menghasilkan *output* daya sebesar 2,97 MW.

Kata kunci: *airfoil*, energi angin, sudu, Q-Blade. turbin angin

1. PENDAHULUAN

Angin merupakan sumber daya alam yang tidak akan habis. Berbeda dengan sumber daya alam yang berasal dari fosil seperti minyak dan gas. Indonesia merupakan negara tropis yang memiliki potensi angin yang banyak, namun sampai saat ini tenaga angin masih sangat jarang dimanfaatkan sebagai sumber energi. Berbeda dengan negara maju yang ada di Eropa seperti Jerman, Belanda, Denmark, dan Rusia mereka sudah banyak menggunakan energi alternatif terutama tenaga angin sebagai pembangkit listrik ataupun untuk keperluan sehari-hari. Indonesia adalah negara kepulauan yang 2/3 wilayahnya adalah lautan dan mempunyai garis pantai terpanjang di dunia yaitu ± 80.791,42 km yang memiliki wilayah potensial untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin.

Komitmen pemerintah dalam penyediaan listrik sebesar 35.000 MW juga mendorong perkembangan dalam perancangan untuk Turbin Angin. Fakta bahwa sumber energi fosil seperti gas, batu

bara akan menemui batas akhir waktunya mendorong berbagai kalangan mencari rancangan yang paling efektif. Selain itu potensi cadangan energi terbarukan yang belum dimanfaatkan berjumlah 28,8 MW untuk potensi panas bumi, tenaga matahari 112 GW, hydro dan minihydro 75 GW, energi berbasis bayu mempunyai potensi sebesar 950 MW, sedangkan biofuel dan biomassa memiliki potensi yang amat besar, sekurang-kurangnya 60 GW.

Menurut beberapa literatur, kecepatan yang dikehendaki untuk turbin angin berada pada kelas 3 sampai 8 yang diperlihatkan pada Tabel 1 dengan angin bertiup pada 3 m/s sampai 20 m/s. Potensi energi angin di Indonesia umumnya berkecepatan lebih dari 5 m/s. Hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pada 120 lokasi menunjukkan beberapa wilayah memiliki kecepatan angin 5 m/s masing-masing Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan pantai Selatan Jawa. Tabel 2 adalah beberapa data hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan

Antariksa Nasional (LAPAN) terhadap kecepatan angin rata-rata di beberapa daerah di Indonesia ^[1].

Tabel 1. Potensi angin berdasarkan kecepatannya

Tabel Kondisi Angin	
Kelas Angin	Kecepatan Angin [m/s]
1	0,3 ~ 1,5
2	1,6 ~ 3,3
3	3,4 ~ 5,4
4	5,5 ~ 7,9
5	8,0 ~ 10,7
6	10,8 ~ 13,8
7	13,9 ~ 17,1
8	17,2 ~ 20,7
9	20,8 ~ 24,4
10	24,5 ~ 28,4
11	28,5 ~ 32,6
12	> 32,6

Tabel 2. Kecepatan angin rata-rata pada ketinggian 50 m di atas permukaan tanah

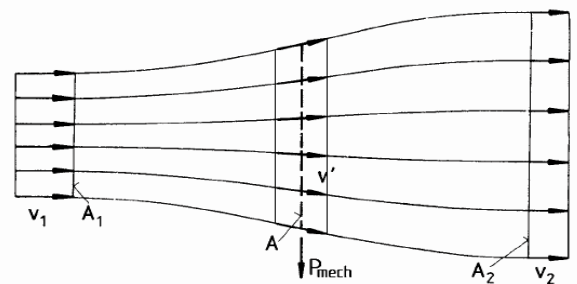
No	Lokasi	Kecepatan rata-rata [m/s]
1	Desa KEMADANG, Kec. Tepus, Kab. G. Kidul, DIY	5,11
2	P. KARYA, Kep. Seribu DKI	5,34
3	Desa BINANGEUN, Kec. Muara, Kab. Lebak, BANTEN	5,24
4	UPT OITUI, Kec. Wira, Timur, Kab. Bima, NTB	4,99
5	Desa PAI, Kec. Wera, Kab. Bima, NTB	4,04
6	Desa LIBAS, Kec. Likupang, Kab. Minahasa, SULUT	3,44
7	Desa PATIRONG, Kab. Jeneponto, SULSEL	5,99
8	34 Dusun APPATANAH, Kab. Selayar, SULSEL	7,33
9	Sakteo, Soe NTT	6,13
10	Papagarang, Komodo, Komodo, Manggarai, NTT	3,78
11	Tameras, Soe, NTT	6,88
12	Fatukalen, Timor Tengah Selatan, NTT	7,62

Berdasarkan hal tersebut maka dilakukan perancangan turbin angin dengan skala besar yaitu turbin angin sumbu horisontal dengan kapasitas 3 MW. Alat ini dirancang untuk memanfaatkan energi bayu yang ada di Indonesia. Ketika merancang turbin angin, ada beberapa bagian yang perlu diketahui seperti sudu, rotor hub, *control pitch* sudu, rem dan kopling, transmisi, generator, *control yawing*, anemometer sensor, nael, dan tower.

Desain Turbin Angin

Teori momentum elementer Betz sederhana berdasarkan pemodelan aliran dua dimensi angin yang mengenai rotor menjelaskan prinsip konversi energi angin pada turbin angin. Kecepatan aliran udara berkurang dan garis aliran membelok ketika melalui rotor dipandang pada satu bidang. Berkurangnya kecepatan aliran udara disebabkan sebagian energi kinetik diserap oleh rotor turbin angin. Pada kenyataannya, putaran rotor menghasilkan perubahan kecepatan angin pada arah tangensial yang akibatnya mengurangi jumlah total energi yang dapat diambil dari angin.

Walaupun teori elementer Betz telah mengalami penyederhanaan, namun teori ini cukup baik untuk menjelaskan bagaimana energi angin dapat dikonversi menjadi energi lainnya, seperti gambar aliran yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kondisi aliran udara akibat ekstraksi energi mekanik aliran bebas

Dengan menganggap bahwa kecepatan udara yang melalui penampang A adalah sebesar v , maka aliran volume udara yang melalui penampang rotor pada setiap satuan waktu pada Persamaan 1 ^[2].

$$V = v \cdot A \quad (1)$$

Dengan V merupakan laju volume udara m^3/s , v adalah kecepatan angin $[\text{m/s}]$ dan A = luas area sapuan rotor m^2 . Maka, laju aliran massa dapat dirumuskan dengan Persamaan 2 ^[2].

$$m = \rho \cdot v \cdot A \quad (2)$$

Dengan ρ merupakan massa jenis udara kg/m^3 . Persamaan 3 yang menyatakan energi kinetik yang melalui penampang A pada setiap satuan waktu dapat dinyatakan sebagai daya yang melalui penampang A ^[2].

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (3)$$

P merupakan daya mekanik.

Koefisien daya adalah hal penting dalam merancang turbin angin karena menunjukkan berapa besar energi angin yang dapat diekstraksi dari energi kinetik angin yang melalui penampang rotor. Koefisien daya sangat mempengaruhi kinerja turbin angin, dan dipengaruhi oleh konstruksi turbin angin dan prinsip konversi energinya.

Keluaran daya dari rotor dinyatakan pada Persamaan 4 dengan ^[2].

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 - v_2) \quad (4)$$

Sedangkan daya yang melewati penampang rotor ditunjukkan pada Persamaan 5 ^[2].

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho v_1^3 A \quad (5)$$

Perbandingan daya antara daya keluaran rotor terhadap daya total yang melalui penampang rotor disebut koefisien daya c_p dinyatakan pada Persamaan 6 ^[2].

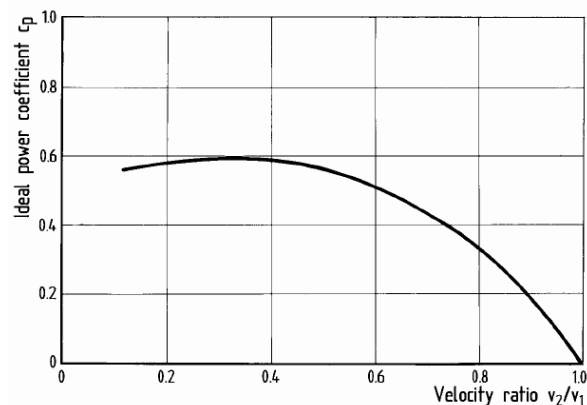
$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 - v_2)}{\frac{1}{2} \rho v_1^3 A} \quad (6)$$

Dengan c_p merupakan koefisien daya (*power coefficient*), P adalah daya mekanik yang dihasilkan rotor dan P_0 merupakan daya

mekanik total yang terkandung dalam angin melalui A . Persamaan 6 dapat disederhanakan menjadi Persamaan 7 ^[2].

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right| \cdot \left| 1 + \frac{v_2}{v_1} \right| \quad (7)$$

Dengan memasukkan nilai v_2/v_1 , maka c_p dapat disajikan dalam bentuk Gambar 2 ^[2].



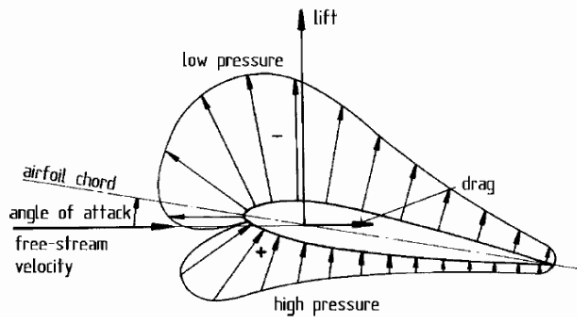
Gambar 2. Koefisien daya terhadap rasio kecepatan aliran udara

c_p akan bernilai maksimum jika $v_2/v_1 = 1/3$, ini disebut dengan *Betz's limit*, di mana nilai koefisien daya tidak akan melebihi nilai ideal yaitu 0,593.

Ada dua macam gaya yang menggerakkan rotor pada turbin angin, yaitu gaya *lift* dan *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 sayap akan lebih kecil dari bagian bawah pesawat, hal ini menyebabkan adanya gaya angkat pada sayap tersebut yang disebut gaya *lift*. Sedangkan gaya *drag* adalah gaya hambat yang arahnya berlawanan dengan arah gerak benda. Gaya aerodinamik yang dialami sudu ketika dilalui aliran udara ditunjukkan pada Gambar 3.

Turbin angin jenis *drag* umumnya memiliki koefisien daya yang relatif rendah karena banyak terjadi rugi-rugi yang ditimbulkan oleh turbulensi yang terjadi. Kecepatan putar rotornya juga relatif rendah. Turbin angin jenis *lift* memiliki koefisien daya yang relatif besar dan kecepatan sudut rotor

yang relatif tinggi dibandingkan dengan turbin angin jenis *drag*.



Gambar 3. Gaya aerodinamik yang dialami sudu ketika dilalui aliran udara

Gaya *lift* dan *drag* bergantung pada koefisien *lift* C_L dan koefisien *drag* C_D , juga berbanding lurus dengan kecepatan dengan kecepatan angin. Luas penampang sudu dan sudut serang juga mempengaruhi besarnya gaya *lift* L dan *drag* D yang timbul. *Lift* dan *drag* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 8 dan 9 [2].

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A v^2 \quad (8)$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \quad (9)$$

Dengan L merupakan gaya *lift* dan D merupakan gaya *drag*.

Rotor terdiri dari komponen yang keseluruhannya berputar ketika beroperasi. Tempat terjadinya ekstraksi energi kinetik angin menjadi energi mekanik rotasi rotor. Diameter rotor yang dipilih berkaitan dengan besar luaran daya yang diinginkan. Hubungan antara daya keluaran, kecepatan angin nominal, dan diameter rotor ditunjukkan pada Persamaan 10 [4].

$$P = \frac{1}{8} \rho \pi D^2 v^3 c_p \quad (10)$$

Maka, diameter didapat dengan menggunakan Persamaan 11 [4].

$$D = \sqrt{\frac{8P}{\rho \pi v^3 c_p}} \quad (11)$$

dengan D merupakan diameter rotor, P adalah daya, ρ adalah kerapatan udara, v adalah

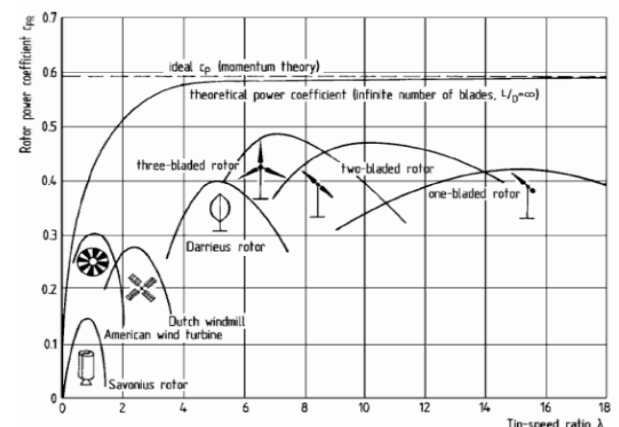
kecepatan angin dan C_p adalah koefisien daya. Selain luaran daya, kecepatan angin mula juga menjadi pertimbangan pemilihan diameter rotor, semakin besar diameter rotor, maka kecepatan angin minimal yang diperlukan untuk memutar rotor menjadi lebih kecil.

Pemilihan jumlah sudu berkaitan dengan rasio kecepatan ujung (*tip speed ratio*) yang diinginkan dan juga aspek keindahan. Jumlah sudu yang banyak akan menghasilkan *tip speed ratio* yang kecil, sedangkan jumlah sudu yang lebih sedikit akan menghasilkan *tip speed ratio* yang besar. Jumlah sudu yang umum pada turbin angin adalah satu sudu, dua sudu, atau tiga sudu, namun ada juga yang menggunakan hingga 20 sudu.

Tip speed ratio (rasio kecepatan ujung) adalah rasio kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan angin bebas. Kecepatan angin nominal yang tertentu, *tip speed ratio* akan berpengaruh pada kecepatan putar rotor. Turbin angin tipe *lift* akan memiliki *tip speed ratio* yang relatif lebih besar dibandingkan dengan turbin angin tipe *drag*. *Tip speed ratio* dihitung dengan menggunakan Persamaan 12 [2].

$$\lambda = \frac{\pi D n}{60 v} \quad (12)$$

Dengan λ merupakan *tip speed ratio*, D adalah diameter rotor, n adalah putaran rotor dan v adalah kecepatan angin. Gambar 4 menunjukkan variasi nilai *tip speed ratio* dan koefisien daya c_p untuk berbagai macam turbin angin [2].

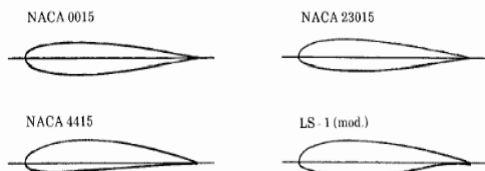


Gambar 4. Nilai koefisien daya dan *tip speed ratio* untuk berbagai turbin angin

Profil *airfoil* adalah elemen penting dalam konversi energi angin. Profil *airfoil* memberikan nilai koefisien *drag* yang kecil jika dibandingkan dengan *lift* yang diberikan.

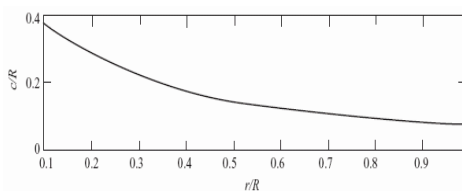
Terdapat beberapa variabel yang dinyatakan dalam menggambarkan bentuk *airfoil* diantaranya panjang profil *airfoil* (*chord*), ketebalan (*thickness*), dan kelengkungan (*chambers*). Bentuk *airfoil* untuk turbin angin umumnya melengkung pada bagian atas dan lebih datar atau bahkan cekung pada bagian bawah, ujung tumpul pada bagian depan dan lancip pada bagian belakang. Bentuk *airfoil* yang demikian menyebabkan kecepatan udara yang melalui sisi atas akan lebih tinggi dari sisi bawah sehingga tekanan udara di bagian atas akan lebih kecil daripada kecepatan udara di bagian bawah.

Penampang sudu *airfoil* memungkinkan efisiensi yang tinggi. Untuk turbin angin, profil *airfoil* yang digunakan tergantung pada beberapa pertimbangan diantaranya aspek koefisien daya yang ingin dicapai, aspek estetika, dan aspek keterbuatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Berbagai bentuk airfoil yang berkembang saat ini

Ada empat macam bentuk sudu secara umum yaitu persegi panjang (*rectangular*), tirus (*linier taper*), tirus terbalik (*reverse linier taper*), tirus parabolik (*parabolic taper*). Geometri sudu bentuk tirus pada Gambar 6.



Gambar 6. Geometri sudu bentuk tirus

Bentuk sudu tirus memiliki efisiensi yang lebih besar daripada bentuk persegi panjang,

dan bentuk tirus parabolik memiliki efisiensi lebih besar daripada bentuk tirus lurus. Bentuk sudu yang memiliki efisiensi paling kecil adalah bentuk tirus terbalik, umumnya digunakan untuk pompa air ladang.

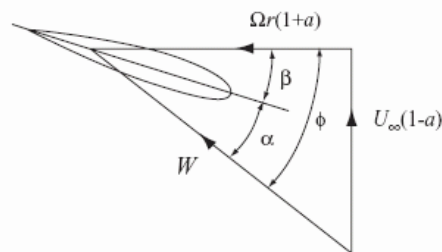
Bentuk sudu adalah fungsi dari *tip speed ratio*, diameter rotor, dan jumlah sudu. Elemen – elemen penting yang dipilih dalam merancang sudu adalah bentuk *planform* sudu, lebar sudu (*chord*) c , jari – jari pangkal (*root radius*), tebal sudu, dan sudut *pitch*. Hugh Piggots memberikan formulasi untuk menentukan lebar sudu sebagai fungsi jarak dari pusat rotasi dengan memakai pendekatan Betz seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 13 [2].

$$C = \frac{16\pi.R(R/r)}{9.\lambda^2 B} \quad (13)$$

dengan C merupakan lebar sudu (*chord*), R adalah radius rotor, r adalah jarak dari pusat rotasi dan B merupakan jumlah sudu. Untuk menentukan sudut *pitch* β dapat digunakan Persamaan 14 [2].

$$\beta = \arctan\left(\frac{2R}{3r\lambda}\right) - \alpha \quad (14)$$

Dengan α merupakan sudut serang, R adalah radius rotor, r adalah jarak dari pusat rotasi, λ adalah *tip speed ratio*.



Gambar 7. Elemen kecepatan yang terjadi pada sudu

Arah angin untuk setiap elemen berbeda, disebut *apparent wind direction* (Gambar 7). Besarnya *apparent wind* w , merupakan resultan dari kecepatan angin bebas dan kecepatan tangensial elemen rotor yang dinyatakan dengan Persamaan 15 [2]

$$w_r = v \times \sqrt{1 + \left(\frac{r}{R}\lambda\right)^2} \quad (15)$$

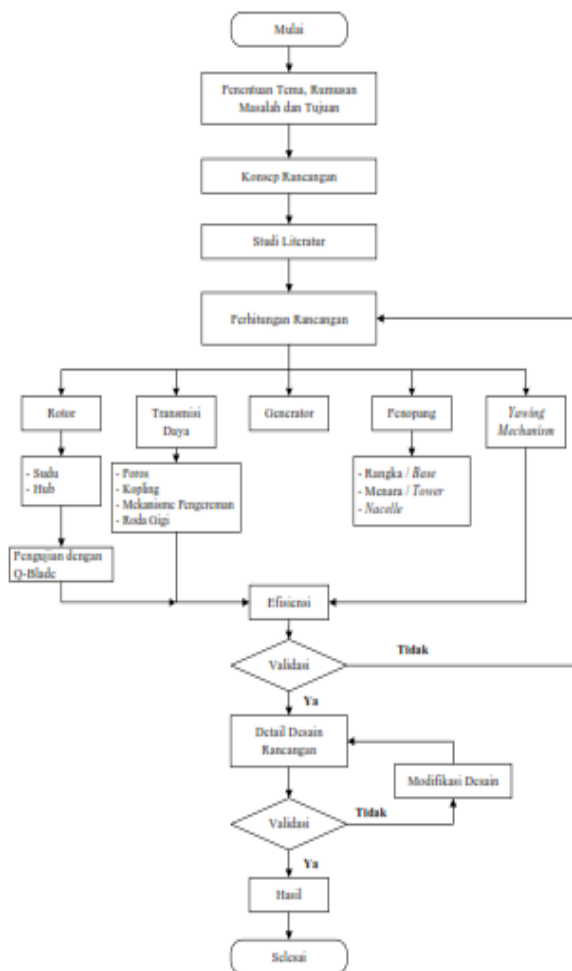
Dengan w_r merupakan kecepatan angin resultan, v adalah kecepatan angin bebas, λ adalah *tip speed ratio*, r adalah jarak elemen dari pusat rotasi dan R merupakan radius rotor. Arah *apparent wind* dihitung dengan menggunakan Persamaan 16 [2].

$$\Phi = \arctan \frac{R}{r\lambda} \quad (16)$$

dengan Φ merupakan sudut *apparent wind*, R merupakan radius rotor, r adalah jarak elemen dari pusat rotasi dan λ merupakan *tip speed ratio*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

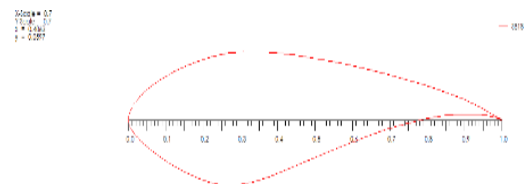
Metode perancangan yang digunakan diperlihatkan pada diagram alir pada Gambar 8.



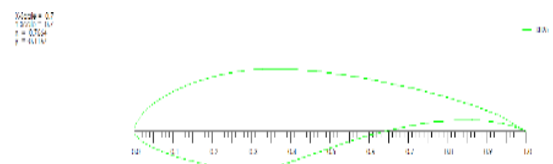
Gambar 8. Diagram Alir Rancangan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

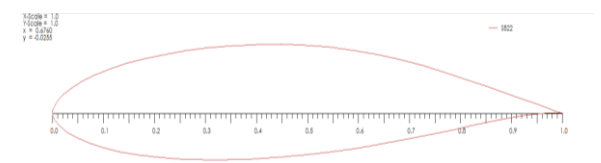
Beberapa data yang sudah ditentukan sebagai dasar untuk merancang turbin angin sumbu horizontal, di antaranya daya (P) sebesar 3000000 W, tinggi *hub* sebesar 110, jumlah sudu (B) 3 Sudu, *tip speed ratio* (λ) sebesar 9, koefisien daya (C_p) sebesar 0,493, penampang *Airfoil*, bagian pangkal/root adalah NREL S818 (Gambar 9), bagian midspan adalah NREL S825 (Gambar 10) dan bagian ujung/tip adalah NREL S822 (Gambar 11).



Gambar 9. Geometri NREL S818



Gambar 10. Geometri NREL S825



Gambar 11. Geometri NREL S822

Berdasarkan Tabel 1 untuk mendapatkan kecepatan angin pada ketinggian 110 m, maka diperlukan Persamaan 16 [5].

$$v_w(h) = v_{ref} \times \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (16)$$

dengan $v_w(h)$ merupakan kecepatan angin pada ketinggian h , v_{ref} adalah kecepatan angin pada ketinggian referensi dan α adalah Hellman eksponen sebesar 0,4. Berdasarkan Persamaan 16 dan Tabel 1, maka didapatkan kecepatan angin di ketinggian 110 m ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kecepatan angin rata-rata pada ketinggian 110 m di atas permukaan tanah

No	Lokasi	Kecepatan rata-rata (m/s)
1	Desa KEMADANG, Kec. Tepus, Kab. G. Kidul, DIY	5,11
2	P. KARYA, Kep. Seribu DKI	5,34
3	Desa BINANGEUN, Kec. Muara, Kab. Lebak, BANTEN	5,24
4	UPT OITUI, Kec. Wira, Timur, Kab. Bima, NTB	4,99
5	Desa PAI, Kec. Wera, Kab. Bima, NTB	4,04
6	Desa LIBAS, Kec. Likupang, Kab. Minahasa, SULUT	3,44
7	Desa PATIRONG, Kab. Jeneponto, SULSEL	5,99
8	34 Dusun APPATANAH, Kab. Selayar, SULSEL	7,33
9	Sakteo, Soe NTT	6,13
10	Papagarang, Komodo, Komodo, Manggarai, NTT	3,78
11	Tameras, Soe, NTT	6,88
12	Fatukalen, Timor Tengah Selatan, NTT	7,62

Berdasarkan Tabel 3, maka untuk kecepatan angin rata – rata untuk desain turbin angin ini adalah 7,53 m/s dengan ketinggian 110 m. Mendapatkan diameter rotor menggunakan Persamaan 11, maka diameter rotor rancangan turbin angin ini didapat sebesar 170 m. Luas *swept area* sebesar sebesar 22707,143 m². Kecepatan putar didapat dengan menggunakan Persamaan 2.12, maka didapat kecepatan putar rotor rancangan ini sebesar 7,62 rpm.

Menggunakan Persamaan 16 dan dengan data awal proses, sudu rancangan ini dibagi menjadi 9 segmen dari 3 *airfoil*, maka hasil distribusi *airfoil* dan panjang *chord* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Panjang *chord* pada tiap segmen

Segmen	Posisi, r (m)	NREL S8xx	Chord (m)
1	10	18	13,681
2	19,375	18	7,061
3	28,75	18	4,759
4	38,125	25	3,588
5	47,5	25	2,880
6	56,875	25	2,405
7	66,25	22	2,065
8	75,625	22	1,809
9	85	22	1,610

Setiap jenis *airfoil* memiliki nilai *drag*, *lift*, dan sudut serang yang berbeda, untuk jenis NREL S818, S825, dan S822 nilai tersebut dihitung dari *software* Qblade dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai C_L/C_D Max pada penampang *airfoil*

Airfoil	C_L/C_D Max	α	C_L	C_D
NREL S818	109,125	9	1,43	0,013
NREL S825	122,57	6,25	1,30	0,011
NREL S822	120,861	4,75	0,80	0,007

Nilai sudut serang (α) pada Tabel 5. Maka nilai sudut *pitch* (β) didapat dengan menggunakan Persamaan 2.14, hasil dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Sudut *pitch*

Segmen	Posisi, r (m)	α (deg)	β (deg)
1	10	9	23,20
2	19,375	9	9,00
3	28,75	9	3,35
4	38,125	6,25	3,13
5	47,5	6,25	1,30
6	56,875	6,25	0,07
7	66,25	4,75	0,68
8	75,625	4,75	0,01
9	85	4,75	-0,51

Berdasarkan data hasil hitungan nilai *chord* dan sudut *pitch* yang ada pada Tabel 4 dan 6, didapatkan nilai untuk yang mempunyai perbedaan yang cukup jauh, sehingga akan sulit pada proses manufaktur dan biayanya. Oleh sebab

itu hal tersebut perlu diatasi dengan melakukan linierisasi. Persamaan linierisasi *chord* dan sudut *pitch* dapat ditulis dengan Persamaan 17 dan 18 [7].

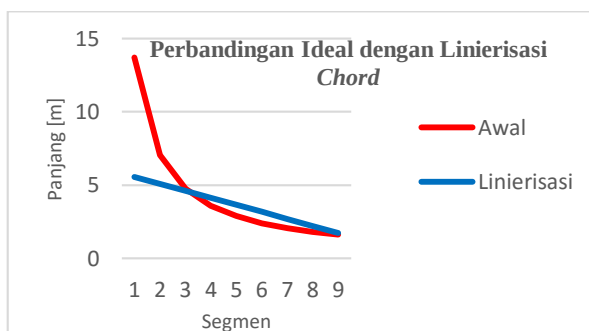
$$C = 2,5(C_{90} - C_{50})\frac{r}{R} + 2,25C_{50} - 1,25C_{90} \quad (17)$$

$$\beta = 2,5(\beta_{90} - \beta_{50})\frac{r}{R} + 2,25\beta_{50} - 1,25\beta_{90} \quad (18)$$

C_{50} merupakan chord dari bentuk sudu yang ideal di 0,5R, C_{90} adalah chord bentuk sudu yang ideal di 0,9, β_{50} adalah sudut pitch dari bentuk sudu yang ideal di 0,5R dan β_{90} adalah sudut pitch dari bentuk sudu yang ideal di 0,9R. Maka nilai chord dan sudut pitch setelah linierisasi seperti ditunjukkan pada Tabel 7 dan Gambar 12 dan 13.

Tabel 7 chord dan sudut pitch setelah dilinierisasi

Segmen	Posisi, r [m]	C [m]	β [deg]
1	10	5,569	4,30
2	19,375	5,090	3,69
3	28,75	4,611	3,08
4	38,125	4,132	2,46
5	47,5	3,653	1,85
6	56,875	3,174	1,24
7	66,25	2,695	0,62
8	75,625	2,216	0,01
9	85	1,737	-0,60



Gambar 12. Grafik perbandingan chord awal dengan linierisasi

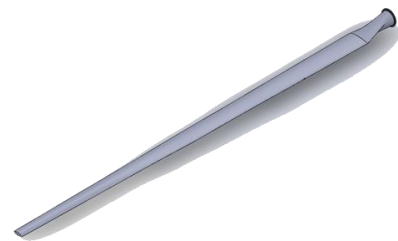


Gambar 13. Grafik perbandingan sudut pitch awal dengan linierisasi

Berikut Gambar 14 dan 15 yang merupakan gambar sudu awal dan sudu yang sudah linierisasi.

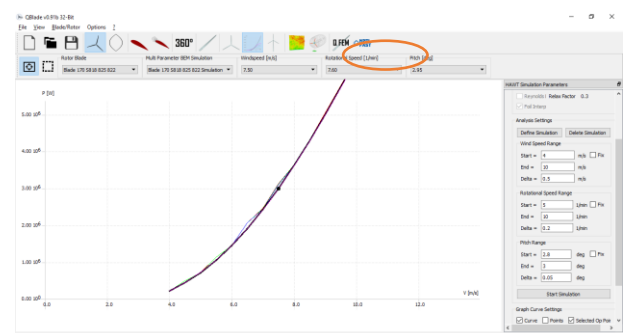


Gambar 14. Sudu Awal



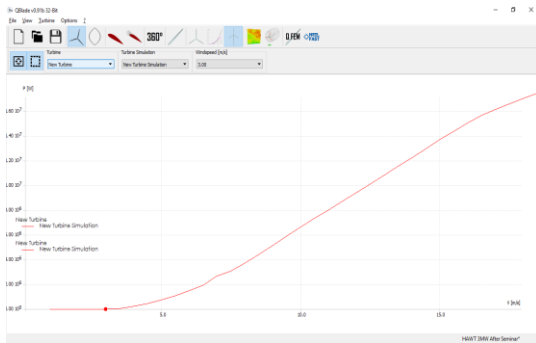
Gambar 15 Sudu Linierisasi

Dalam perancangan ini juga dilakukan simulasi menggunakan software Q-Blade untuk mengetahui bentuk dari rotor serta output yang dihasilkan. Simulasi ini menguji sudu sesuai dengan hasil hitungan untuk mengetahui daya dari rotor. Pada sudu memiliki *twist*, untuk mendapatkan nilai tersebut diperlukan analisis menggunakan software Q-Blade, maka didapatkan nilai sudut *pitch* pada sudu ini adalah 2,95°. Hasil analisis sudut *pitch* sududitunjukkan pada Gambar 16.



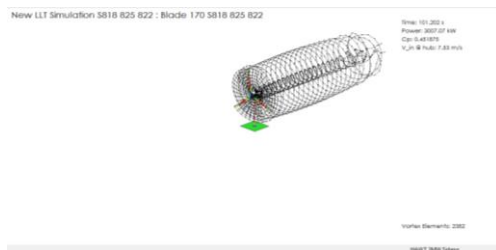
Gambar 16. Nilai sudut pitch setelah dianalisis

Desain turbin angin ini memiliki kecepatan angin awalan (*cut-in*) untuk memutar rotornya. Untuk mendapatkan nilai tersebut didapat dari analisis software Q-Blade, maka kecepatan angin awal untuk menggerakkan rotor ini adalah 3 m/s. Gambar 17 menunjukkan hasil analisis nilai *cut in*.



Gambar 17. Nilai *cut-in* hasil analisis

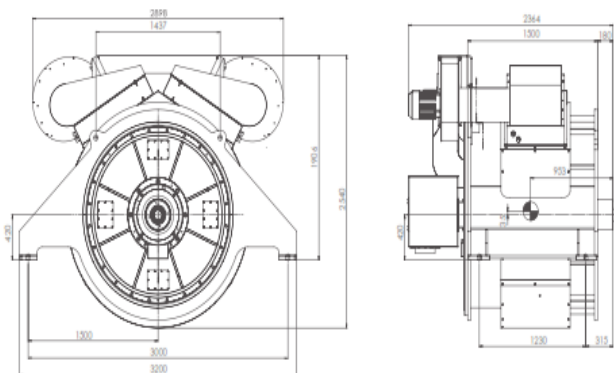
Setelah dimasukkannya nilai panjang chord, sudut *pitch*, dan *tip speed ratio*, maka dapat disimulasikan daya yang dihasilkannya pada Gambar 18.



Gambar 18. Hasil simulasi rotor dengan Q-Blade

Hasil *output* rotor menghasilkan daya sebesar 3007,07 kW dengan berputar searah jarum jam. Generator yang akan digunakan pada rancangan ini adalah menggunakan generator yang ada di pasaran, pemilihan generator jenis AC 3 fasa dari The Switch dengan tipe PMG 3300-365, dengan daya sebesar 3,3 MW, kecepatan sebesar 365 rpm, tinggi poros sebesar 1000 mm, massa sebesar 13900 kg, tegangan sebesar 690 V, kuat arus sebesar 2900 A dan faktor daya sebesar 0,95.

Gambar 19 menunjukkan dimensi dari generator PMG3300-365.



Gambar 19 Generator The Switch PMG3300-365

Gearbox yang akan dipilih berdasarkan spesifikasi pabrik yang digunakan adalah pabrikan dari BONENG. Cara penentuan *gearbox* yang akan digunakan dengan mendapatkan rasio kecepatan putar (i_N) sebesar 47,9 dengan menggunakan Persamaan 19 [8].

$$i_N = \frac{n_{gen}}{n_{rot}} \quad (19)$$

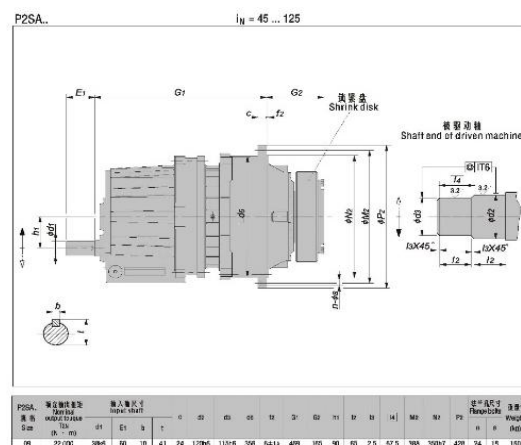
Sesuai dengan rasio kecepatan putar (i_N) sebesar 47,9 dan tipe – tipe *gearbox*, maka tipe yang digunakannya P2SB dengan transmisi roda gigi jenis *planetary 2-stage*. Penentuan ukuran *gearbox* diperlukan Persamaan 20 [8].

$$P_{1N} \geq P_1 \times f_1 \times f_2 \quad (20)$$

Dengan P_{1N} merupakan daya penentu tiap *gearbox* yang ada di tabel kapasitas transmisi, P_1 adalah daya *gearbox* [W] yang didapat dari Persamaan 21.

$$P_1 = T_2 \times n_1 / (9550 \times i_N \times \eta) \quad (21)$$

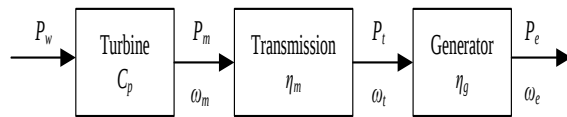
dengan T_2 merupakan torsi rotor turbin [Nm], n_1 adalah kecepatan putar generator [rpm], i_N adalah rasio kecepatan putar, η adalah efisiensi *gearbox* (=93% tipe P2SB), f_1 adalah faktor yang digerakan (=1,25) dan f_2 adalah faktor yang menggerakkan (=1,00). Maka nilai P_1 adalah 3224,271 W dan $P_{1N} \geq 4030,34 W$. Dipilih ukuran *gearbox* dari tabel kapasitas transmisi adalah P2SB09-50, dengan $P_{1N} = 32 kW$. Dengan ukuran *gearbox* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 20. *Gearbox* BONENG tipe P2SB-50

Penelitian ini menghitung besarnya daya yang dihasilkan (Persamaan 22) setelah energi angin melewati rotor, gearbox dan juga generator dengan menggunakan skema alur energi pada Gambar 21.

$$P_t = \eta_m P_m \quad (22)$$



Gambar 21. Keluaran daya pada turbin angin sumbu horisontal

P_m merupakan daya yang dihasilkan oleh turbin angin, yaitu sebesar 3007,07 kW. Maka untuk mengetahui besarnya *output* daya dari hasil rancangan digunakan Persamaan 23.

$$P_e = \frac{(P_m \times \eta_m) + (P_g \times \eta_g)}{2} \quad (23)$$

P_e adalah daya *output* generator, η_m adalah efisiensi transmisi dan η_g adalah efisiensi generator. sehingga daya yang didapat dari rancangan ini adalah 2965787,55 W.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis menggunakan *software* Q-Blade serta pemilihan komponen untuk perancangan turbin angin ini. Kecepatan angin yang digunakan untuk merancang ini adalah sebesar 7,53 m/s dengan ketinggian 110 m. Nilai *tip speed ratio* (λ) adalah 9, koefisien daya (C_p) adalah 0,493. Hasil rancangan turbin angin ini menghasilkan nilai *swept area* rotor sebesar 22707,143 m².

Luas area tersebut memiliki radius rotor sebesar 85 m dengan diameter hub 10 m. Rotor ini mempunyai kecepatan putar sebesar 7,62 rpm. Rotor turbin angin ini menggunakan penampang *airfoil* NREL S818 untuk bagian pangkal, NREL S825 untuk bagian *primary*, dan NREL S822 untuk bagian ujung. Menggunakan material Triax untuk bagian *shell*. Hasil pengujian rotor yang menggunakan *software* Q-Blade dengan sudut *pitch* 2,95° serta kecepatan awalan angin untuk memutar turbin ini (*cut in*) sebesar 3 m/s

dengan daya yang didapat sebesar 3007,07 kW. Generator menggunakan The Switch tipe PMG 3300-365, dengan kecepatan putar 365 [rpm] dan efisiensi 0,95. *Gearbox* menggunakan BONENG dengan tipe P2SB-50, dengan rasio kecepatan putar (i_N) adalah 47,9 dengan transmisi roda gigi jenis *planetary 2-stage* dan efisiensi 0,93. Keseluruhan nilai *output* daya untuk rancangan ini adalah 2,97 MW.

DAFTAR PUSTAKA

- Pudjanarsa, Astu, Djati Nursuhud. 2013. *Mesin Konversi Energi Edisi 3.CV Andi Offset*. Yogyakarta.
- Hau Eric. 2005. *Wind Turbines Fundamental, Technologies, Application, Economics 2nd Edition*. Springer
- Schubek, Peter J., dan Crossley, Richard J., *Wind Turbine Blade Desgn, Journal Faculty of Engineering, Division of Material, Mechanics and Structures*, University of Nottingham, University Park, Nottingham NG7 2rd, UK, 2012.
- Heier, Siegfried (2005). *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Tony Burton, et. Al. 2001. *Wind Energy Hand Book*, John Willey & Sons.
- Atmadi, Sulisty, et. Al. Rancangan Bangun Rotor Turbin Angin 10 kW untuk Memperoleh Daya Optimum pada Variasi Jumlah dan Diameter Sudu. Peneliti Pusat Teknologi Dirgantara Terapan, LAPAN
- A. K. Azad and M. Masud Kayzar. 2012. *Design of a Horizontal Axis Wind Turbine fo Electricity Generation in Low Speed Windy Sites*. Department of Mechanical Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka-1000, Bangladesh
- BONENG, P Series Planetary Gear Units, 04/2014.