

PENELITIAN DAN PERANCANGAN SUDU TURBIN ANGIN LPN 10000 E

Sulistyo Atmadi*)

Firman Hartono, Ahmad Jamaludin Fitroh**)

*)Peneliti Pusat Teknologi Dirgantara Terapan, LAPAN

**Peneliti Teknik Penerbangan ITB

ABSTRACT

Research and design of a windturbine blade has been conducted with both on-design and off-design condition. In this case, design of a windturbine LPN 10000 E was carried out based on information such as wind speed, rotational speed, torsion, turbine diameter, and the resulted power. Blade Element Theory was used, which in principle, similar to an aerofoil and Momentum Theory, whereby mass and momentum conservation Law were applied. From the analysis, Eppler 66-1014 aerofoil was selected, and out of 2 configuration, configuration 2 was also chosen. Blade diameter of 8.5 m was used. So as the resulting maximum torsion would be greater than that needed by the generator, at a minimum speed of 1 m/sec.

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian dan perancangan sudu turbin angin, baik pada kondisi *on-design* maupun *off-design*. Pada penelitian ini dilakukan rancangan untuk turbin angin LPN 10000 E, dengan data kecepatan angin, kecepatan putar, torsi, diameter turbin serta daya yang dihasilkan. Metode yang digunakan adalah *Blade Element Theory* yang prinsipnya sama dengan analisis sebuah *aerofoil* dan *Momentum Theory*, yaitu dengan menerapkan hukum kekekalan massa dan momentum. Dari hasil analisis dipilih *aerofoil Eppler 66-1014* dan dari konfigurasi sudu 1 dan sudu 2, dipilih konfigurasi sudu 2. Diameter sudu diperoleh 8.5 m, sehingga torsi maksimum yang dihasilkan oleh turbin angin lebih besar dari pada torsi yang dibutuhkan oleh generator pada kecepatan angin minimal 1 m/det.

1 PENDAHULUAN

Latar belakang secara umum dari pembuatan turbin angin ini adalah adanya usaha untuk membangkitkan produksi dalam negeri khususnya dalam bidang aerodinamika dan industri. Hingga saat ini Indonesia masih sangat bergantung pada penyuplai utama tenaga listrik bersumber bahan bakar fosil dari PLN, sehingga sangat diperlukan adanya sumber energi listrik alternatif dengan menggunakan tenaga alam. Salah satu sumber daya alam tak terbatas yang dapat digunakan adalah angin. Angin dapat menyebabkan turbin berputar, dan dengan menggunakan kumparan dan magnet, maka putaran dari turbin tersebut dapat diubah menjadi energi

listrik dengan memanfaatkan prinsip induksi magnetik.

Tulisan ini merupakan penelitian dan perancangan turbin angin, baik pada kondisi *on-design* maupun *off-design*. Kondisi umum angin di Indonesia adalah kecepatan yang relatif rendah. Oleh karena itu diperlukan sebuah turbin angin dengan efisiensi yang cukup baik pada kecepatan rendah sehingga diharapkan dapat menghasilkan power yang cukup besar.

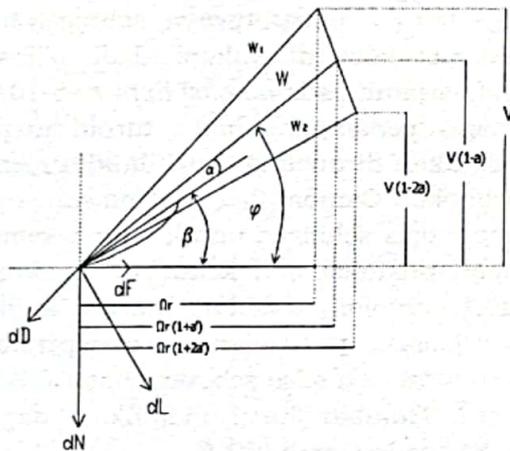
Pada umumnya, *requirement* yang dibutuhkan dalam suatu proses perancangan adalah kecepatan angin, kecepatan putar (rpm), torsi (atau data kinerja generator), diameter, dan berapa power yang ingin dihasilkan.

2 METODOLOGI

Metode yang digunakan untuk merancang sebuah turbin angin adalah *Blade Element Theory* yang prinsipnya sama dengan analisis sebuah *aerofoil* dan *Momentum Theory*, yaitu dengan menerapkan hukum kekekalan massa dan momentum.

2.1 Blade Element Theory

Sketsa dan persamaan untuk *blade element theory* disajikan sebagai berikut.



Gambar 2-1 : Sketsa arah kecepatan dan gaya pada elemen sudu

$$dN = B \frac{1}{2} \rho w^2 c c_l \cos \varphi \left(1 + \frac{c_d}{c_l} \tan \varphi \right) dr \dots (2-1)$$

$$dF = B \frac{1}{2} \rho w^2 c c_l \sin \varphi \left(1 - \frac{c_d}{c_l} \cot \varphi \right) dr \dots (2-2)$$

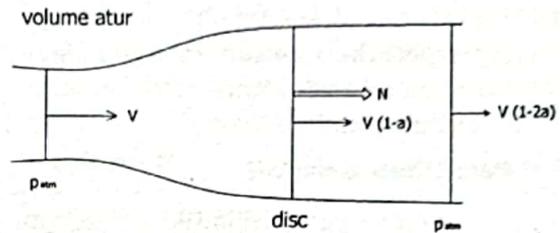
Keterangan:

- D = gaya hambat (N/m)
- N = gaya normal (N/m)
- L = gaya angkat (N/m)
- F = gaya putar (N/m)
- Ω = kecepatan putar (rad/s)
- R = jarak dari hub ke elemen sudu (m)
- a = slip stream
- V = kecepatan angin (m/s)
- w = kecepatan relatif (m/s)
- β = sudut pasang sudu / twist (deg)
- α = sudut serang (deg)
- φ = sudut aliran (deg)
- B = jumlah sudu
- c = chord (m)

- c_l = koefisien gaya hambat
- ρ = kerapatan udara (kg/m³)

2.2 Momentum Theory

Sketsa dan persamaan untuk *momentum theory* disajikan sebagai berikut.



Gambar 2-2: Volume atur pada teori momentum

$$dN = 4\rho V^2 \pi r (1-a)a \dots \text{no losses} \dots (2-3)$$

$$dN = 4\rho V^2 \pi r (1-a)a \left(1 + \frac{c_d}{c_l} \tan \varphi \right) dr \dots (2-4)$$

Persamaan tambahan yang diperlukan,

$$dQ = r dF \dots (2-5)$$

$$Q = \int dQ \dots (2-6)$$

Keterangan:

Q = torsi (N.m)

sehingga power yang dihasilkan oleh turbin angin, adalah

$$P_{av} = \Omega Q \dots (2-7)$$

Efisiensi sebuah turbin angin dapat diformulasikan sebagai perbandingan antara power yang dapat diserap oleh turbin angin terhadap power yang dibawa oleh angin, atau secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\eta = \frac{P_{av}}{\frac{1}{2} \rho V^2 \frac{1}{4} \pi D^2 V} = \frac{P}{\frac{1}{8} \rho \pi D^2 V^3} \dots (2-8)$$

2.3 Alur Perhitungan

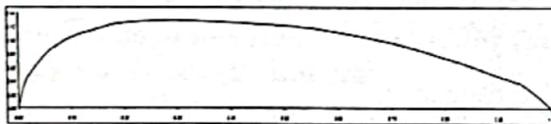
Urutan perhitungan dari sebuah proses perancangan turbin angin sangat bervariasi, tergantung masukan yang diketahui.

Dalam studi kasus kali ini prosedur yang dipilih adalah sebagai berikut :

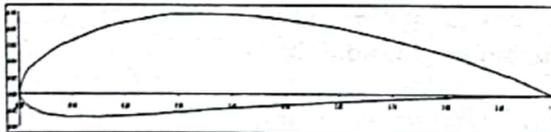
- a. Memilih aerofoil yang akan digunakan sebagai penampang sudu.
- b. Menentukan distribusi *chord* sepanjang span sudu.
- c. Menentukan rpm.
- d. Menghitung diameter turbin angin yang diperlukan untuk menghasilkan power yang diinginkan.
- e. Menghitung efisiensi.

2.4 Pemilihan Aerofoil

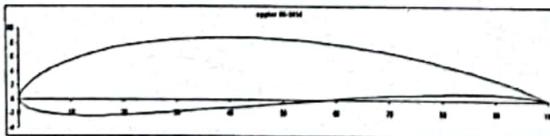
Aerofoil yang dijadikan sebagai kandidat penampang sudu adalah RAF-D, NACA 4412, dan Eppler 66-1014. Bila dilihat kemudahan produksi, maka yang paling mudah dibuat adalah RAF-D karena mempunyai permukaan bawah yang datar, dan apabila ditinjau dari prestasinya maka yang paling baik adalah Eppler 66-1014 karena mempunyai *cl/cd* yang sangat bagus, khususnya pada kondisi *low Reynolds number*. Profil ketiga *aerofoil* seperti pada Gambar 2-5.



Gambar 2-3 : Profil RAF-D



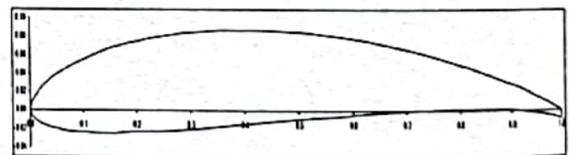
Gambar 2-4 : Profil NACA 4412



Gambar 2-5 : Profil Eppler 66-1014

Setelah dilakukan perhitungan, maka *aerofoil* yang dapat digunakan sebagai penampang sudu agar menghasilkan power sebesar 8.5 kW adalah *aerofoil* Eppler 66-1014, dan ini dicapai pada diameter turbin angin 7.6 m. Pada diameter tersebut, apabila kita menggunakan *aerofoil* RAF-D atau NACA 4412 maka power yang dihasilkan akan kurang dari 8 kW. Sebenarnya bisa saja

kita menggunakan kedua *aerofoil* tersebut untuk menghasilkan power 8.5 kW, namun distribusi *chord* yang dipilih harus sangat kecil, yaitu kurang dari 10 cm. Hal ini dikarenakan apabila distribusi *chord*-nya sangat kecil maka distribusi *cl*-nya menjadi besar (lihat kembali persamaan 2-2), dan untuk kedua *aerofoil* tersebut, pada harga *cl* yang tinggi akan mempunyai *cl/cd* yang cukup baik dan power yang diinginkan akan dapat tercapai. Apabila kita memilih distribusi *chord* yang sangat ramping dengan rpm yang sangat tinggi maka akan menemui kesulitan pada strukturnya, sehingga hal tersebut tidak dilakukan. Jadi pilihan terakhir jatuh pada *aerofoil* Eppler 66-1014 sebagai penampang sudu turbin angin yang akan dirancang. Apabila kita memperhatikan Gambar 2-5, *trailing edge*-nya sangat tipis sehingga untuk alasan kemudahan produksi dan kekuatan struktur, maka *aerofoil* tersebut harus sedikit dimodifikasi, yaitu dengan mempertebal daerah *trailing edge* sebesar sekitar 0.8 % *chord*. Gambar hasil modifikasi dapat dilihat pada Gambar 2-6.



Gambar 2-6: Profil Eppler 66-1014 (modifikasi)

Prestasi dari *aerofoil* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2-7 (Lampiran).

3 ANALISIS DAN HASIL

Dengan batasan perancangan sebagai berikut :

- Kecepatan angin, $V = 9 \text{ m/s}$
- Diameter hub, $D_{\text{hub}} = 0.7 \text{ m}$
- Kondisi operasional = sea level
- Jumlah sudu, $B = 3$
- Sudu = Eppler 66-1014 (modifikasi)

Akan dibahas 2 jenis sudu, yaitu sudu I dan sudu II, di mana sudu II merupakan perpanjangan dari sudu I.

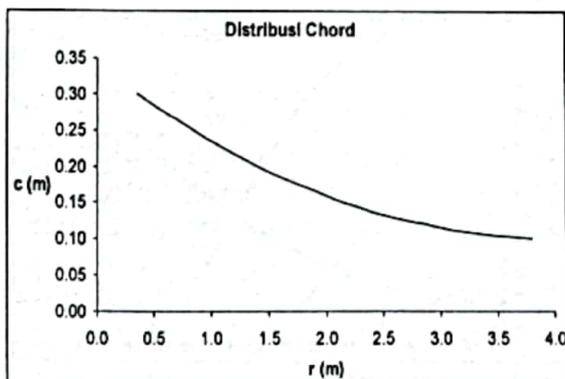
Untuk lebih jelasnya perbandingan sudu I dan sudu II dapat dilihat sebagai berikut.

3.1 Sudu I

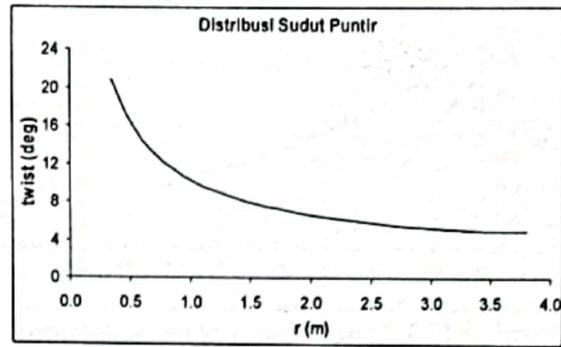
Power output, P = 8.5 kW
 Diameter tip, D = 7.6 m
 Efisiensi = 43 %
 Kecepatan putar = 329 rpm

Distribusi chord dan sudut puntir :

r (m)	chord (m)	twist (deg)
0.3500	0.2998	20.84
0.5225	0.2812	16.13
0.6950	0.2636	13.23
0.8675	0.2468	11.37
1.0400	0.2310	10.09
1.2125	0.2160	9.14
1.3850	0.2020	8.40
1.5575	0.1888	7.80
1.7300	0.1766	7.31
1.9025	0.1653	6.89
2.0750	0.1549	6.53
2.2475	0.1454	6.22
2.4200	0.1368	5.95
2.5925	0.1290	5.71
2.7650	0.1223	5.50
2.9375	0.1164	5.32
3.1100	0.1114	5.18
3.2825	0.1073	5.06
3.4550	0.1041	4.98
3.6275	0.1018	4.93
3.8000	0.1005	4.91



Gambar 3-1: Distribusi chord sepanjang span sudu



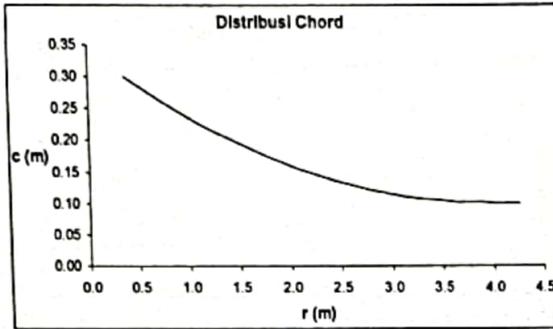
Gambar 3-2: Distribusi sudut puntir sepanjang span sudu

3.2 Sudu II

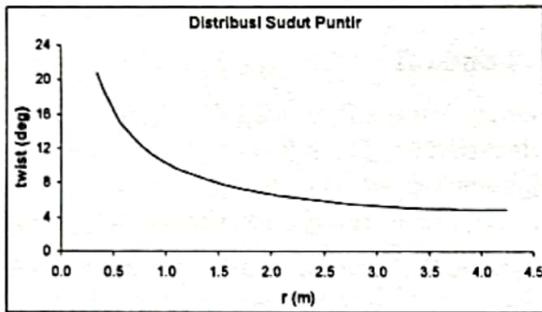
Power output, P = 9.2 kW
 Diameter tip, D = 8.5 m
 Efisiensi = 36 %
 Kecepatan putar = 339 rpm

Distribusi chord dan sudut puntir :

r (m)	chord (m)	twist (deg)
0.3500	0.2998	20.84
0.5225	0.2812	16.13
0.6950	0.2636	13.23
0.8675	0.2468	11.37
1.0400	0.2310	10.09
1.2125	0.2160	9.14
1.3850	0.2020	8.40
1.5575	0.1888	7.80
1.7300	0.1766	7.31
1.9025	0.1653	6.89
2.0750	0.1549	6.53
2.2475	0.1454	6.22
2.4200	0.1368	5.95
2.5925	0.1290	5.71
2.7650	0.1223	5.50
2.9375	0.1164	5.32
3.1100	0.1114	5.18
3.2825	0.1073	5.06
3.4550	0.1041	4.98
3.6275	0.1018	4.93
3.8000	0.1005	4.91
4.0000	0.1000	4.90
4.2500	0.1000	4.88



Gambar 3-3: Distribusi chord sepanjang span sudu



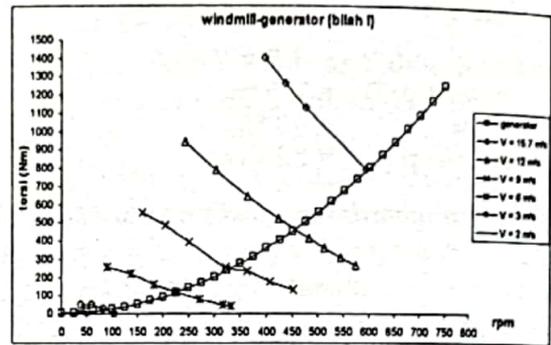
Gambar 3-4: Distribusi sudut puntir sepanjang span sudu

4 ANALISIS OFF DESAIN

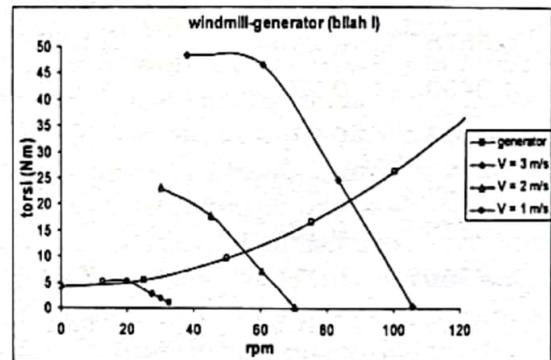
Pada sebuah proses perancangan, umumnya dilanjutkan dengan analisis *off desain*-nya. Hal ini diperlukan untuk melihat prestasi turbin angin yang telah dirancang apabila dioperasikan pada kondisi *off-desain*, misalnya pada kecepatan angin yang berbeda. Hubungan antara torsi dan rpm diasumsikan bahwa kenaikan rpm menyebabkan kenaikan torsi secara kuadratik dengan batasan bahwa pada 0 rpm dibutuhkan torsi sebesar 4 Nm (sesuai dengan *requirement*) dan pada 350 rpm menghasilkan power 10 kW (data generator). Asumsi ini cukup masuk akal mengingat *electric motor* secara umum mempunyai hubungan antara torsi dan rpm adalah polinomial pangkat 2. Pada umumnya setiap *electric motor* mempunyai harga torsi maksimum sedangkan data tentang torsi maksimum pada generator yang akan digunakan masih belum ada sehingga diasumsikan bahwa generator tersebut tidak mempunyai batasan torsi maksimum.

Hubungan antara torsi dan rpm turbin angin beserta asumsi data generator disajikan pada Gambar 4-1

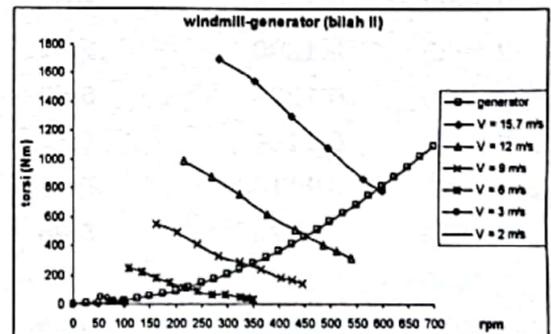
sampai dengan Gambar 4-4 sebagai berikut.



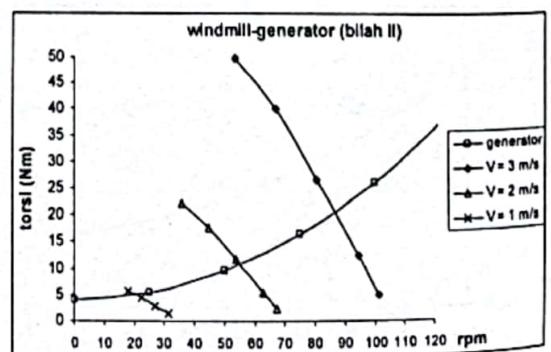
Gambar 4-1: Off-desain turbin angin-generator



Gambar 4-2: Off-desain turbin angin-generator (rpm rendah)



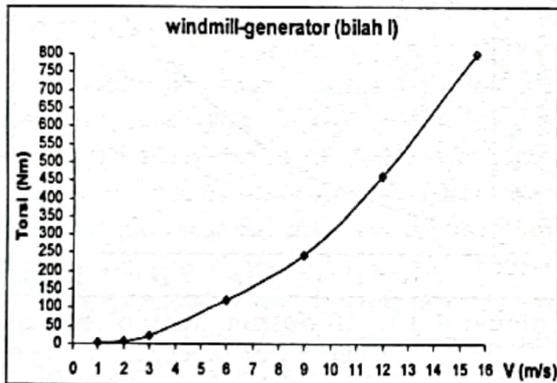
Gambar 4-3: Off-desain turbin angin-generator



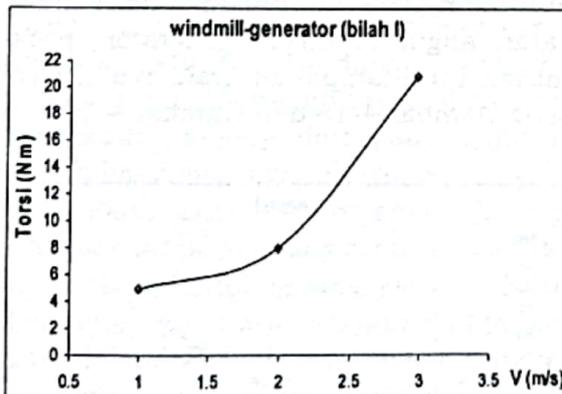
Gambar 4-4: Off-desain turbin angin-generator (rpm rendah)

Dari keempat kurva di atas (sudu I dan sudu II) dapat disimpulkan bahwa pada kecepatan angin 1 m/s, torsi yang diberikan oleh turbin angin sudah lebih besar dari pada torsi yang dibutuhkan oleh generator bahkan pada saat *furling speed*, yaitu 15.7 m/s, torsi yang dihasilkan oleh turbin angin jauh lebih besar dari pada torsi yang dapat diserap oleh generator. Dengan kata lain, turbin angin ini dapat dioperasikan pada kecepatan angin mulai dari 1 m/s.

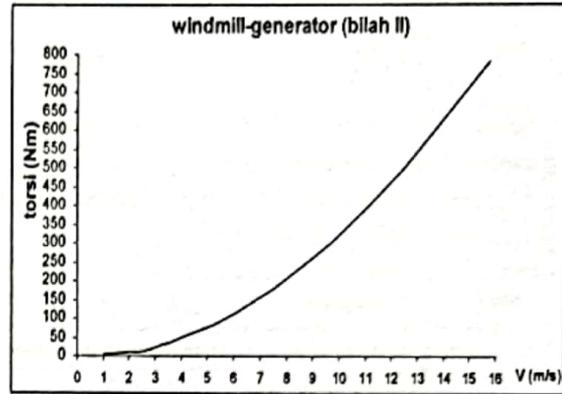
Kedua kurva di atas dapat dibuat menjadi bentuk yang lebih mudah dipahami, yaitu dalam bentuk hubungan antara torsi dan kecepatan angin seperti pada Gambar 4-5 sampai dengan Gambar 4-8.



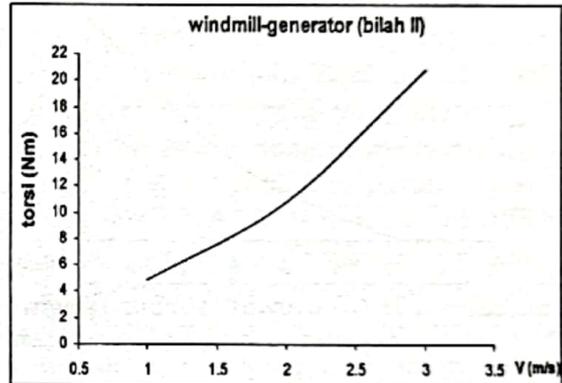
Gambar 4-5: Off-desain turbin angin-generator



Gambar 4-6: Off-desain turbin angin-generator (kecepatan angin rendah)

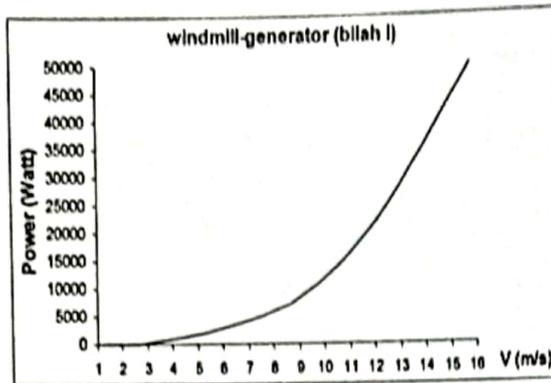


Gambar 4-7: Off-desain turbin angin-generator

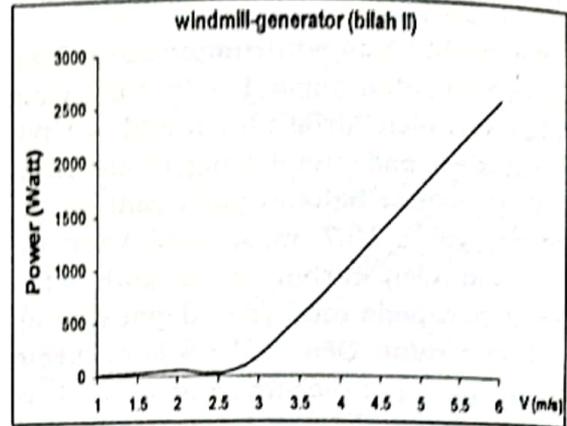


Gambar 4-8: Off-desain turbin angin-generator (kecepatan angin rendah)

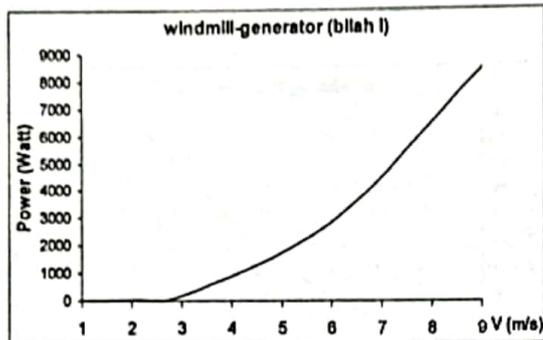
Perlu ditekankan di sini bahwa torsi turbin angin pada Gambar 4-5 sampai dengan Gambar 4-8 adalah torsi maksimum yang dapat dihasilkan pada kecepatan angin tertentu, dan itu tercapai pada rpm rendah sedangkan apabila kita ingin membandingkan power maksimum yang dapat dihasilkan oleh turbin angin pada kecepatan angin tertentu dengan power yang akan diserap oleh generator maka power maksimum dari turbin angin belum tentu terjadi pada torsi maksimum, karena power merupakan hasil perkalian antara torsi dengan kecepatan putar, dan hasilnya seperti pada Gambar 4-9 sampai dengan Gambar 4-14.



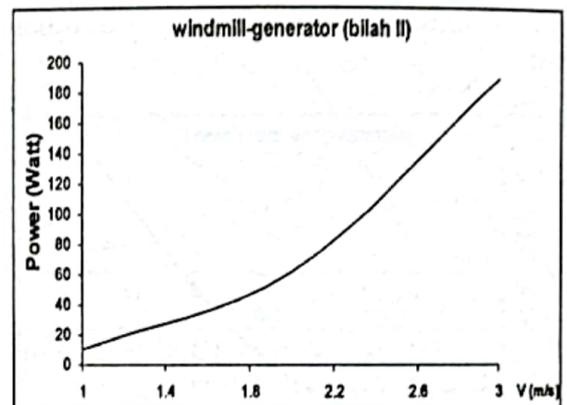
Gambar 4-9: *Off-desain* turbin angin-generator



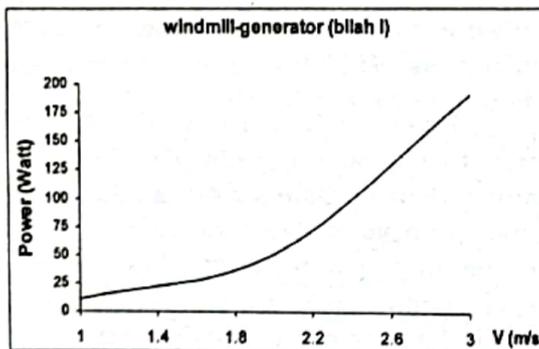
Gambar 4-13: *Off-desain* turbin angin-generator (kecepatan angin sedang)



Gambar 4-10: *Off-desain* turbin angin-generator (kecepatan angin sedang)

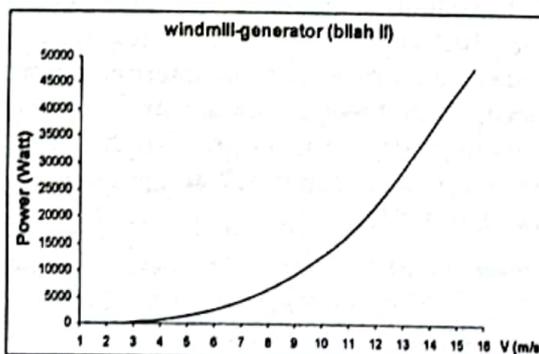


Gambar 4-14: *Off-desain* turbin angin-generator (kecepatan angin rendah)

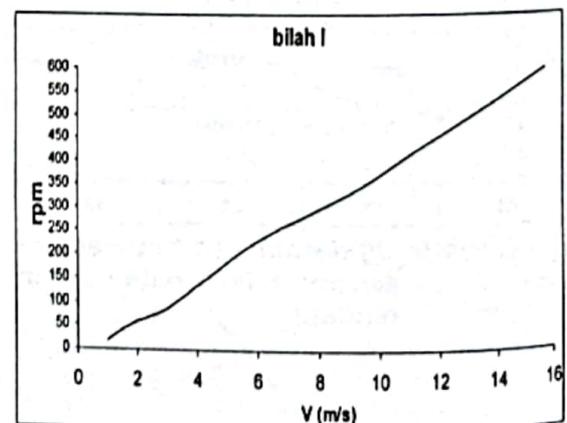


Gambar 4-11: *Off-desain* turbin angin-generator (kecepatan angin rendah)

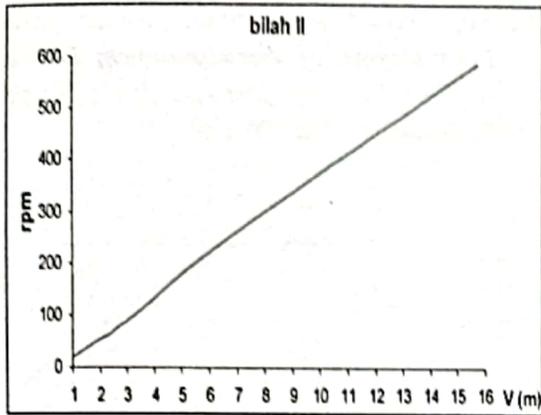
Pada pengujian di lapangan, dibutuhkan data hubungan antara kecepatan angin dan rpm generator, pada tulisan ini ditampilkan grafiknya seperti ini ditampikan grafiknya seperti ini pada Gambar 4-15 dan Gambar 4-16.



Gambar 4-12: *Off-desain* turbin angin-generator



Gambar 4-15: Kurva kecepatan angin-rpm generator



Gambar 4-16: Kurva kecepatan angin-rpm generator

Sekali lagi perlu ditekankan di sini bahwa semua kurva generator di atas berasal dari asumsi seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

5 UJI PUTAR

Semua data di atas adalah kondisi pada saat turbin angin dalam keadaan sudah berputar. Sekarang yang akan kita lihat adalah apakah pada saat turbin angin tersebut masih diam, dengan kecepatan angin tertentu sudah dapat berputar, dan pada kecepatan angin minimum berapa turbin angin tersebut dapat berputar dari kondisi diam? Dalam hal ini hanya sudu I yang dihitung uji putar karena apabila sudu I dapat berputar pada kecepatan angin minimal seperti yang disyaratkan maka secara otomatis sudu II juga dapat berputar, karena sudu II mempunyai diameter yang lebih panjang dari pada sudu I dengan konfigurasi yang serupa.

Pada saat turbin angin belum berputar dan adanya angin pada kecepatan tertentu, sudut serang yang dimiliki oleh setiap penampang sudu sangatlah besar (kondisi *stall*) dan masih belum ada data aerodinamika aerofoil sebagai penampang sudu pada sudut serang yang sangat besar. Sudut serang yang dirasakan oleh setiap sudu adalah 90° dikurangi sudut puntirnya (Gambar 2-1) sehingga sudut serang yang dirasakan oleh sudu bervariasi dari 69.16° (hub) hingga 85.09° (tip). Salah satu solusi

yang masih dapat diterima adalah dengan menggunakan data C_d pelat datar yang diberi aliran secara tegak lurus, atau pada sudut serang 90° . Torsi yang dihasilkan oleh turbin angin adalah komponen gaya dalam arah putaran dikalikan dengan jarak dari pangkal (hub), dan gaya tersebut dapat diformulasikan sebagai berikut.

$$C_T = C_{d \text{ pelat datar}} \cos \alpha = C_{d \text{ pelat datar}} \sin \beta \dots (5-1)$$

Berdasarkan *requirement* di atas, maka turbin angin ini harus menyediakan torsi minimal sebesar 4 Nm pada kecepatan angin 3 m/s supaya dapat berputar. Berdasarkan hasil perhitungan, maka torsi awal (0 rpm) yang disediakan oleh turbin angin dengan menggunakan teori pelat datar pada kecepatan angin 3 m/s adalah 14.92 Nm dan ini telah memenuhi persyaratan yang diinginkan.

Berdasarkan hasil perhitungan, maka kecepatan angin minimum yang dibutuhkan supaya turbin angin dapat berputar adalah 1.6 m/s.

6 KESIMPULAN

Dari analisis dan penelitian tersebut di atas, dapat dibuat beberapa kesimpulan sebagai berikut.

- Aerofoil yang dipilih sebagai penampang sudu adalah Eppler 66-1014 dengan modifikasi.
- Dari ke dua konfigurasi sudu, power yang dihasilkan oleh kedua jenis sudu telah memenuhi persyaratan, namun demikian dipilih konfigurasi II, yang lebih mendekati batasan power yang diharapkan, yaitu 10 kW pada putaran 350 rpm.
- Torsi generator diasumsikan meningkat secara kuadratik terhadap rpm.
- Torsi maksimum yang dihasilkan oleh turbin angin lebih besar dari pada torsi yang dibutuhkan oleh generator pada kecepatan angin minimal 1 m/s.
- Turbin angin ini dapat mulai berputar dari kondisi diam pada kecepatan angin minimal 1.6 m/s.

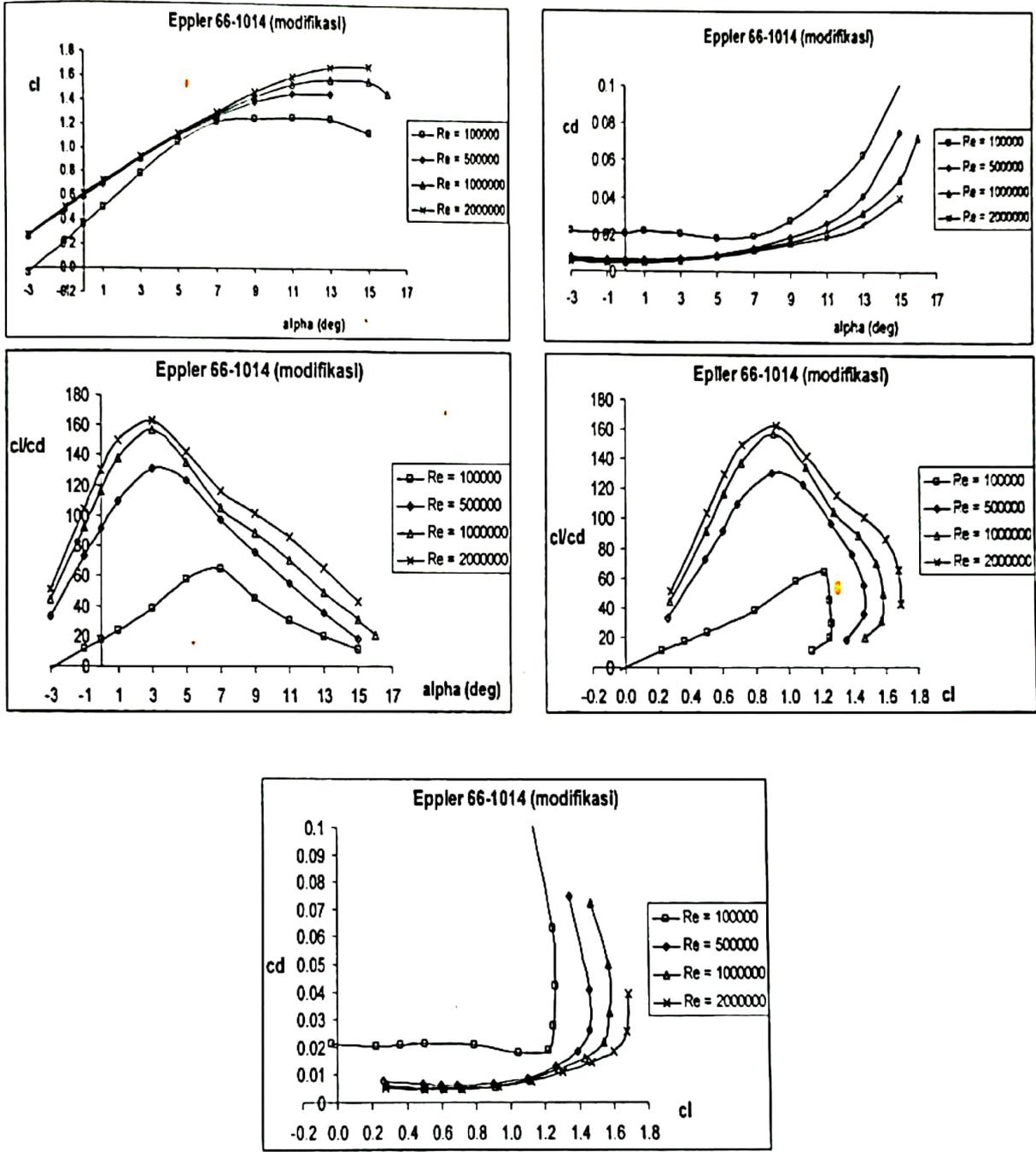
DAFTAR RUJUKAN

Anderson, John D., Jr, 1985. *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc Grawhill company, Singapore.

Abbot, Ira H; Von Doenhoff, Albert E, 1959. *Theory of wing section*, Dover Publications, inc, New York.

Kuethe, Arnold M., Chow, Chuen yen, *Foundations of Aerodynamics: Bases of Aerodynamic Design*, John Wiley & Sons, Inc, New York.

LAMPIRAN



Gambar 2-7: Grafik performasi aerofoil Eppler 66-1014 (modifikasi)