

EFEK DEFLEKSI PADA SUDU TURBIN ANGIN TERHADAP KELUARAN DAYA

Sulistyo Atmadl'. Ahmad Jamaludin Fitroh"
* Peneliii Pusat Teknologi Dirgantara Terapan . LA PAN
">Penelltl Teknlk Penerbangan ITB

ABSTRACT

The type of material used in the fabrication of wind turbine blade is a very important factor so that it will not exceed the allowable maximum deflection. An analysis is conducted to study this deflection effect to that power output and as case study, a 7.6 m blade of 10 kW LPN 10000 E turbine is used. Several assumption as such as deflection due to wind speed at perpendicular to local plane blade, effective diameter blade and direction of aerodynamic at aerofoil plane local blade are considered. The distribution of blade deflection along the twisted span is assumed uniform. Calculation is performed for the polynomial order of 2,3 and 4, with variety of deflection of 0.2 m, 0.5 m, 1 m and 1.5 m. For design wind speed of 9 m/s it was found that for 0.5 deflection, the losses of 6%, 9% and 12% for blade shape polynomial order 2,3 and 4 conseqtively are produced; whereas for 1.5 m deflection, losses are 46%, 53% and 56% for the same polynomial shape. If a maximum loss of 10% is taken, then the max allowable deflection is 0.5 m.

ABSTRAK

Dalam pembuatan sudu turbin angin, perlu diperhatikan material yang digunakan, agar defleksi yang terjadi tidak melebihi batas toleransi yang ditentukan. Untuk itu dilakukan analisis efek defleksi pada sudu turbin angin terhadap keluaran daya untuk mengetahui berapa toleransi defleksi sudu akibat angin. Sebagai contoh kasus, digunakan sudu dengan diameter 7,6 m dan daya 10 kW dari turbin angin LPN 10000 E, dengan batasan dan asumsi bahwa yang diperhitungkan adalah efek defleksi terhadap kecepatan angin pada penampang lokal sudu dalam arah normal, diameter efektif sudu dan arah gaya-gaya aerodinamika pada aerofoil sebagai penampang lokal sudu, serta selama sudu terdefleksi distribusi sudut puntir sepanjang span tidak berubah. Perhitungan dilakukan untuk bentuk defleksi fungsi polinomial pangkat 2,3 dan 4, serta besar defleksi 0,2 m, 0,5 m, 1 m dan 1,5 m. Sebagai hasil untuk kecepatan angin 9 m/det sebagai kecepatan rencana, maka diperoleh untuk defleksi 0,5 m *losses* yang terjadi 6%,9%,12% ber turut-turut untuk kelengkungan sudu fungsi pangkat 2,3 dan 4. Sedangkan untuk defleksi 1,5 m *losses* yang terjadi 46%, 53%, 56% berturut-turut untuk kelengkungan sudu fungsi pangkat 2,3 dan 4. bila di ambil batasan maksimum *losses* sekitar 10%, maka toleransi defleksi yang diijinkan hanya 0,5 m.

Kata kunci :*DeJleksi, Sudu, Turbin angin, Keluaran daya, Rugi-rugi*

1 PENDAHULUAN

Analisis efek defleksi sudu terhadap prestasi sebuah turbin angin ini dilakukan, terutama untuk mengetahui daya yang hilang (*power losses*) akibat sudu yang terdefleksi. Hal ini karena bahan sudu yang kurang *rigid*, dapat diketahui seberapa penting kekakuan sudu diper-

lukan, yang merupakan masukan untuk proses pembuatan sudu.

1.1 Data Sudu

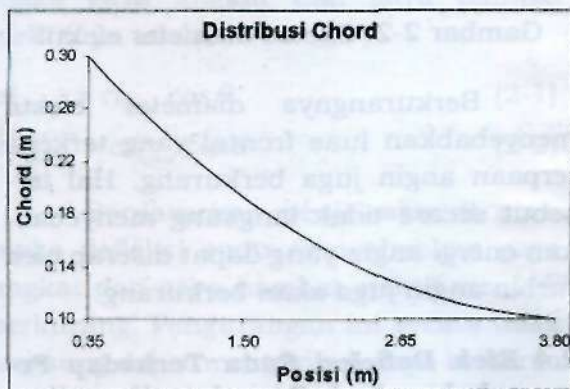
Untuk analisis efek defleksi ini digunakan sudu dengan spesifikasi umum sebagai berikut

- Aerofoil penampang sudu
- Eppler 66-1014

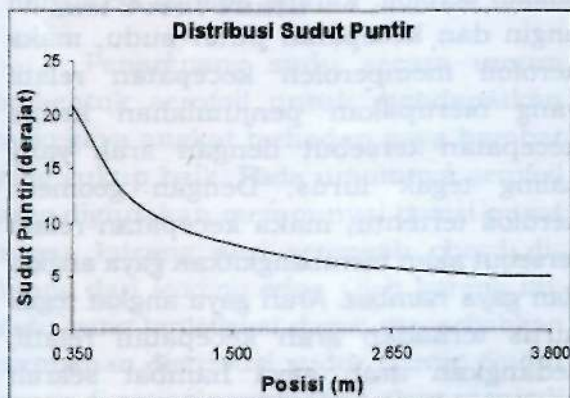
- Diameter pangkal sudu (*hub*)= 0.70 m
- Diameter ujung sudu (*tip*) = 7.60 m
- Kecepatan angin operasional= 9 m/s
- Kecepatan putar operasional= 340 RPM
- Daya = 10000 W
- Distribusi *chord* dan sudut puntir seperti pada Tabel 1-1, Gambar 1-1 dan Gambar 1-2.

Tabel 1-1: DISTRIBUSI *CHORD* DAN SUDUT PUNTIR GEOMETRI AWAL

Posisi (m)	Chord (m)	Sudut Puntir (derajat)
0.350	0.2998	20.84
0.695	0.2636	13.23
1.040	0.2310	10.09
1.385	0.2020	8.40
1.730	0.1766	7.31
2.075	0.1549	6.53
2.420	0.1368	5.95
2.765	0.1223	5.50
3.110	0.1114	5.18
3.455	0.1041	4.98
3.800	0.1005	4.91



Gambar 1-1: Distribusi *chord* geometri awal



Gambar 1-2: Distribusi sudut puntir geometri awal

1.2 Batasan Masalah dan Asumsi

Untuk menganalisis efek defleksi sudu terhadap prestasi turbin angin secara keseluruhan, terlebih dahulu harus diketahui bentuk defleksi sudu tersebut pada saat sedang berputar. Namun untuk mengetahui profil defleksi sudu secara langsung merupakan hal yang sangat sulit. Cara yang paling mungkin dilakukan adalah memotret atau mengambil gambar turbin angin pada saat sedang beroperasi dari sisi samping. Cara lainnya yang lebih sederhana adalah mengasumsikan bentuk defleksi sudu turbin angin tersebut.

Berikut ini adalah batasan masalah dan asumsi yang akan digunakan :

- Yang akan diperhitungkan adalah efek defleksi terhadap,
 - Kecepatan angin pada penampang lokal sudu dalam arah normal.
 - Diameter efektif sudu
 - Arah gaya-gaya aerodinamika pada aerofoil sebagai penampang lokal sudu
- Selama sudu terdefleksi, distribusi sudut puntir sepanjang span sudu tidak berubah.
- Data generator yang didapat bahwa generator tersebut hanya mampu menghasilkan daya sebesar 10 kW pada 350 RPM dan mempunyai *starting torsion* sekitar 10 Nm. Sedangkan untuk analisis kali ini diperlukan data generator yang meliputi hubungan antara RPM dan torsi atau RPM dan daya. Oleh karena itu, rnaka diasumsikan bahwa hubungan antara RPM dan torsi merupakan fungsi kuadratik sehingga hubungan antara RPM dan daya merupakan polinomial pangkat 3.
- Bentuk lengkungan akibad defleksi sudu merupakan fungsi polinomial pangkat 2, pangkat 3, dan pangkat 4.

2 METODA ANALISIS

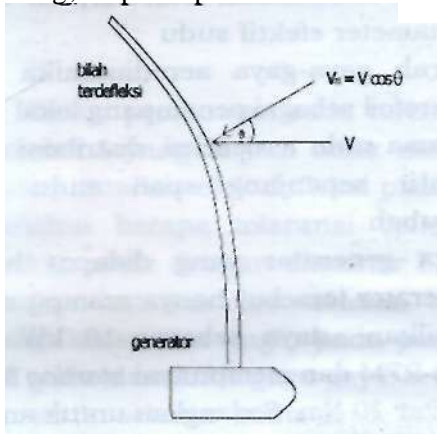
2.1 Pendahuluan

Dalam memproduksi sudu turbin angin, sudu yang dihasilkan harus kaku (*rigid*). Hal ini dikarenakan semua teori

dan perhitungan tentang *swirl machine* pada umumnya dan sudu turbin angin pada khususnya dibangun dengan asumsi bahwa arah aliran angin tegak lurus terhadap penampang lokal sudu. Apabila sudu terdefleksi pada saat berputar, maka efek yang ditimbulkan antara lain, kecepatan angin dalam arah normal di setiap penampang sudu menjadi berkurang, diameter efektif sudu menjadi lebih kecil daripada diameter semula, perubahan arah gaya-gaya aerodinamika dan distribusi sudut puntir sepanjang sudu juga akan berubah.

2.2 Efek Defleksi Sudu Terhadap Kecepatan Lokal

Sudu turbin angin dirancang tegak lurus terhadap arah kecepatan angin. Apabila sudu mengalami defleksi, maka kecepatan angin dalam arah normal akan berkurang, seperti pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1: Sketsa sudut defleksi dan arah kecepatan angin

Keterangan:

V = kecepatan angin

V_n = kecepatan angin dalam arah normal

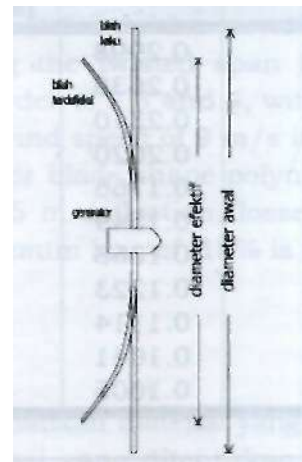
θ = sudut defleksi

Berdasarkan Gambar 2-1 di atas, maka dapat dilihat bahwa kecepatan angin mengenai sudu dengan sudut tertentu. Kecepatan angin tersebut akan diuraikan menjadi 2 komponen arah, yaitu kecepatan dalam arah normal dan kecepatan angin dalam arah sejajar permukaan sudu. Yang berkontribusi terhadap penghasil daya adalah kecepatan

angin dalam arah normal. Oleh sebab itu, semakin besar sudut defleksi sudu maka kecepatan angin dalam arah normal juga semakin berkurang dan secara langsung menyebabkan daya keluaran juga berkurang.

2.3 Efek Defleksi Sudu Terhadap Diameter Efektif

Defleksi sudu pada turbin angin menyebabkan diameter efektif sudu menjadi lebih kecil daripada diameter semula, seperti pada Gambar 2-2.

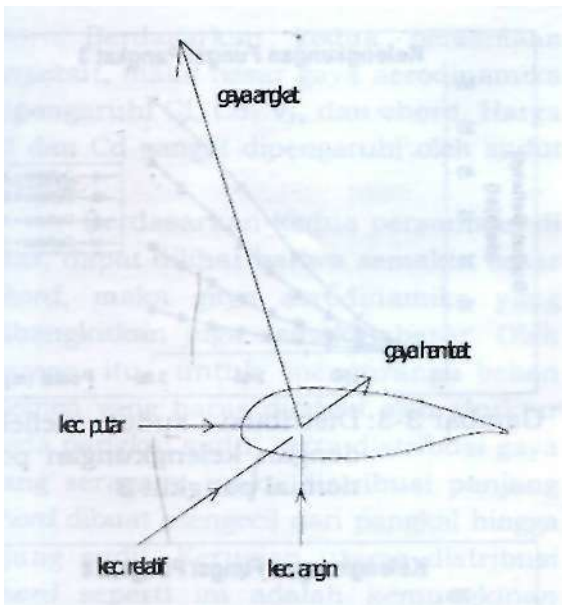


Gambar 2-2: Sketsa diameter efektif

Berkurangnya diameter efektif menyebabkan luas frontal yang terkena terpaan angin juga berkurang. Hal tersebut secara tidak langsung menyebabkan energi angin yang dapat diserap oleh turbin angin juga akan berkurang.

2.4 Efek Defleksi Sudu Terhadap Perubahan Arah Gaya Aerodinamika

Penampang sudu turbin angin adalah aerofoil. Karena adanya kecepatan angin dan kecepatan putar sudu, maka aerofoil memperoleh kecepatan relatif yang merupakan penjumlahan kedua kecepatan tersebut dengan arah yang saling tegak lurus. Dengan geometri aerofoil tertentu, maka kecepatan relatif tersebut akan membangkitkan gaya angkat dan gaya hambat. Arah gaya angkat tegak lurus terhadap arah kecepatan relatif, sedangkan arah gaya hambat searah dengan arah kecepatan relatif, seperti pada Gambar 2-3.



Gambar 2-3: Sketsa gaya aerodinamika pada penampang sudu

Proyeksi gaya angkat terhadap arah putaran adalah merupakan sumber daya turbin angin, sedangkan proyeksi gaya hambat terhadap arah putaran adalah merupakan sumber *losses* daya turbin angin. Apabila sudu terdefleksi, maka gaya angkat dan gaya hambat efektifnya adalah

$$c l_{\text{efektif}} = c l_{\text{awal}} \cos \theta \quad (2-1)$$

$$c d_{\text{efektif}} = c d_{\text{awal}} \cos \theta \quad (2-2)$$

Berdasarkan penjelasan di atas, maka defleksi sudu menyebabkan gaya angkat dan gaya hambat efektif menjadi berkurang. Pengurangan ini secara tidak langsung dapat mengurangi daya keluaran turbin angin.

2.5 Efek Defleksi Sudu Terhadap Distribusi Sudut Puntir

Penampang sudu secara umum berbentuk aerofoil untuk mendapatkan rasio gaya angkat terhadap gaya hambat yang cukup baik. Pada umumnya aerofoil yang digunakan mempunyai posisi pusat massa kurang dari setengah chord dihitng dari *leading edge*. Oleh karena itu, sudu yang terdefleksi dapat menyebabkan perubahan distribusi sudut puntir. Sudut puntir di setiap penampang akan menjadi semakin besar dibandingkan geometri awal.

Bagian sudu yang mempunyai sudut defleksi yang lebih besar adalah bagian sudu di daerah ujung (*tip*). Pada daerah ujung sudu terjadi beban defleksi yang lebih besar. Hal ini dikarenakan pada daerah ujung sudu memperoleh beban aerodinamika yang lebih besar, ditambah pula dengan geometri sudu yang semakin mengecil dari pangkal hingga ujung sudu.

Semakin besar beban aerodinamika dan semakin kecil geometri, maka perubahan sudut puntir juga semakin besar. Dengan kata lain, daerah di ujung sudu akan mengalami perubahan sudut puntir yang lebih besar. Di lain pihak, daerah ujung sudu merupakan kontributor terbesar dalam penghasil daya sehingga apabila daerah ujung sudu mengalami perubahan sudut puntir yang lebih besar, maka perubahan prestasi turbin angin juga semakin besar. Kesimpulannya adalah perubahan sudut puntir akibat sudu yang terdefleksi sangat mempengaruhi kinerja turbin angin.

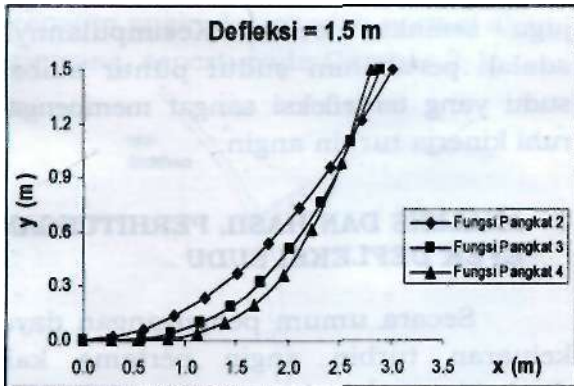
3 ANALISIS DAN HASIL PERHITUNGAN EFEK DEFLEKSI SUDU

Secara umum pengurangan daya keluaran turbin angin pertama kali disebabkan oleh kecepatan angin dan kekuatan struktur sudu. Keduanya mempengaruhi bentuk lengkungan sudu saat terdefleksi. Bentuk lengkungan sudu menyebabkan diameter efektif sudu menjadi lebih kecil dibandingkan diameter awal. Pengurangan diameter efektif ini menyebabkan pengurangan energi angin yang dapat diserap oleh turbin angin. Selain itu lengkungan sudu akibat defleksi menghasilkan distribusi sudut defleksi di setiap penampang sudu. Adanya sudut defleksi di setiap penampang sudu menyebabkan pengurangan kecepatan normal dalam arah normal di setiap penampang sudu, khususnya pada daerah di ujung sudu. Pengurangan kecepatan angin dalam arah normal yang dirasakan oleh tiap penampang sudu menyebabkan putaran sudu dan putaran generator menjadi berkurang sehingga pada akhirnya daya yang dihasilkan juga berkurang.

3.1 Geometri Lengkungan

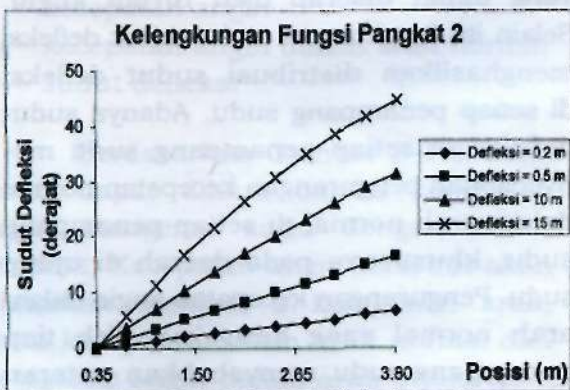
Sudu yang terdefleksi sudah pasti akan berbentuk sebuah kurva atau lengkungan. Permasalahannya adalah bagaimana bentuk lengkungan tersebut, apakah merupakan sebuah fungsi polinomial, fungsi logaritma, fungsi tertentu lainnya, atau fungsi tak tentu. Untuk hal tersebut diperlukan analisis struktur yang lebih mendalam untuk mengetahuinya.

Seperti yang telah dijelaskan pada bab I, dalam analisis ini bentuk lengkungan diasumsikan merupakan fungsi polinomial pangkat 2, pangkat 3, dan pangkat 4. Defleksi akan divariasikan antara 0.2, 0.5, 1.0, dan 1.5 m. Gambar 3-1 merupakan plot lengkungan pada defleksi 1.5 m.

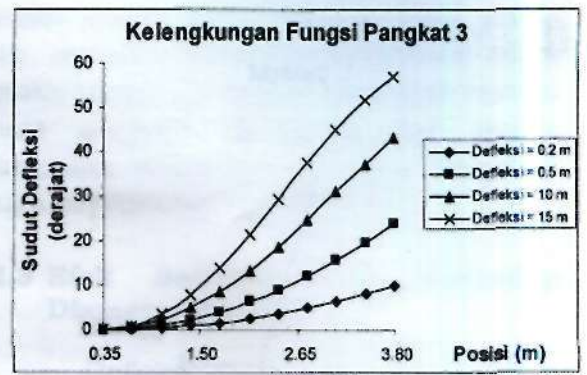


Gambar 3-1: Bentuk lengkungan sebagai fungsi polinomial

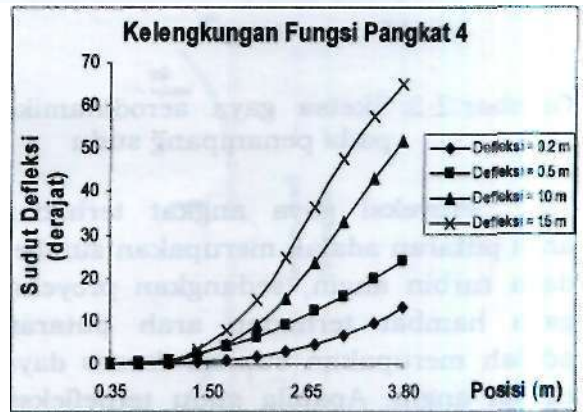
Distribusi sudut defleksi di sepanjang sudu untuk variasi besar defleksi dan bentuk lengkungan yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 3-2, Gambar 3-3 dan Gambar 3-4.



Gambar 3-2: Distribusi sudut defleksi dengan kelengkungan polinomial pangkat 2



Gambar 3-3: Distribusi sudut defleksi dengan kelengkungan polinomial pangkat 3



Gambar 3-4: Distribusi sudut defleksi dengan kelengkungan polinomial pangkat 4

3.2 Efek Kecepatan Angin dan Kekuatan Struktur Terhadap Bentuk Lengkungan

Bentuk sudu memanjang dari pangkal (*hub*) hingga ujung (*tip*). Semakin ke ujung, kecepatan tangensial yang dirasakan oleh penampang sudu semakin besar. Dengan kecepatan angin yang sudah pasti konstan di setiap penampang sudu, maka kecepatan relatif yang merupakan penjumlahan antara kecepatan angin dan kecepatan tangensial juga semakin besar di daerah ujung sudu.

Semakin besar kecepatan relatif yang dirasakan oleh penampang sudu, maka semakin besar gaya aerodinamika yang dihasilkan. Hal tersebut sesuai dengan persamaan berikut:

$$l = \frac{1}{2} \rho V_r^2 c d l \quad (3-1)$$

$$d = \frac{1}{2} \rho V_r^2 c c d \quad (3-2)$$

Berdasarkan kedua persamaan tersebut, maka besar gaya aerodinamika dipengaruhi CI, Cd, V_r , dan chord. Harga CI dan Cd sangat dipengaruhi oleh sudut serang.

Berdasarkan kedua persamaan di atas, dapat dilihat bahwa semakin besar *chord*, maka gaya aerodinamika yang dibangkitkan juga semakin besar. Oleh karena itu, untuk mengurangi beban momen yang harus ditahan oleh struktur pada pangkal sudu, serta distribusi gaya yang seragam, maka distribusi panjang *chord* dibuat mengecil dari pangkal hingga ujung sudu. Kerugian utama distribusi *chord* seperti ini adalah kemungkinan sudu mengalami defleksi pada daerah ujung sudu semakin besar, khususnya pada kecepatan angin yang sangat besar.

3.3 Efek Bentuk Lengkungan Defleksi Terhadap Kecepatan Angin Arab Normal

Distribusi *chord*, distribusi sudut puntir, tebal sudu, struktur sudu, dan jenis material merupakan faktor utama yang menentukan bentuk lengkungan defleksi.

Semakin kecil *chord* pada daerah ujung sudu, maka semakin besar defleksi pada ujung sudu dan semakin besar pula sudut defleksinya. Panjang *chord* pada daerah pangkal sudu tidak mempengaruhi bentuk lengkungan defleksi, melainkan sebagai syarat kekuatan struktur saja.

Semakin kecil sudut puntir pada daerah ujung sudu, maka semakin besar defleksi pada daerah ujung sudu karena hampir tegak lurus terhadap kecepatan angin. Sudut puntir pada daerah pangkal sudu tidak mempengaruhi bentuk lengkungan. Semakin besar sudut puntir pada daerah ujung sudu, maka kekuatan struktur penahan momen pada pangkal sudu juga semakin besar.

Tebal sudu sudah pasti mempengaruhi bentuk lengkungan defleksi. Semakin tipis sudu, maka semakin besar defleksinya. Pada bab sebelumnya telah dijelaskan bahwa sudu yang digunakan mempunyai *chord* yang semakin ke ujung semakin

kecil. Apabila menggunakan aerofoil yang sama di setiap penampang sudu, maka tebal sudu akan semakin tipis dari pangkal hingga ujung sudu sehingga defleksi yang terjadi juga akan semakin besar.

Berdasarkan semua analisis di atas, disimpulkan bahwa penentuan bentuk lengkungan akibat defleksi sudu sangat sulit. Oleh karena itu diasumsikan bahwa bentuk lengkungan merupakan fungsi polinomial. Dalam analisis kali ini diambil contoh fungsi polinomial pangkat 2, 3, dan pangkat 4. Bentuk lengkungan sebagai fungsi poli-nomial tersebut telah digambarkan dengan Gambar 3-1.

Berdasarkan Gambar 3-1 dapat dilihat bahwa semakin tinggi polinomial, maka dengan defleksi *tip* sudu yang sama akan menghasilkan sudut defleksi yang semakin besar, khususnya pada daerah ujung sudu. Semakin ke ujung [*tip*], maka sudut defleksinya juga semakin besar (Gambar 3-2 sampai dengan 3-4). Dari ketiga gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada daerah pangkal sudu sudut defleksinya sangat kecil. Namun pada daerah di ujung sudu sudut defleksinya sangat besar, bahkan dapat mencapai 60 derajat.

Berdasarkan Gambar 2-1, maka dapat dilihat bahwa semakin besar sudut defleksi, maka semakin kecil kecepatan arah normal yang dirasakan oleh penampang sudu khususnya pada daerah di ujung sudu. Dengan kata lain, semakin tinggi polinomial sebagai bentuk lengkungan, atau semakin besar lengkungan pada daerah *tip* menyebabkan kecepatan angin arah normal yang dirasakan oleh penampang daerah ujung sudu juga semakin kecil.

3.4 Efek Kecepatan Angin Arah Normal Terhadap Daya Keluaran

Kecepatan angin arah normal yang dirasakan oleh penampang sudu sangat mempengaruhi prestasi turbin angin. Berdasarkan distribusi kecepatan angin dalam arah normal sepanjang sudu pada Gambar 3-9 sampai dengan Gambar 3-11 dan Gambar 3-14 sampai dengan

Gambar 3-16 dapat dilihat bahwa kecepatan arah normal pada ftp dapat *berkurang hingga mencapai 50 persen*.

Dengan distribusi sudut puntir yang tidak berubah sepanjang *span* sudu, maka semakin kecil kecepatan angin dalam arah normal menyebabkan putaran sudu turbin angin menurun. Putaran sudu sebanding dengan putaran generator sehingga daya yang dihasilkan juga akan lebih kecil.

Di lain pihak, semakin kecil kecepatan angin arah normal yang dirasakan oleh penampang sudu, maka semakin kecil kecepatan relatifnya. Berdasarkan persamaan (3-1) dan (3-2), terlihat secara umum kecepatan relatif mempunyai pengaruh secara kuadratik terhadap gaya aerodinamika yang dibangkitkan. Sebagai contoh apabila kecepatan angin dalam arah normal menjadi setengah dari kecepatan angin semula, maka gaya aerodinamika yang dibangkitkan menjadi sekitar seperdelapan dari harga semula.

Gaya-gaya aerodinamika dalam arah tangensial atau arah putaran merupakan sumber penggerak turbin angin. Perkalian antara gaya-gaya tersebut dengan putaran sudu merupakan torsi penggerak generator. Daya keluaran turbin angin didapat dari perkalian antara torsi dan putaran generator. Dalam hal ini putaran generator sama dengan putaran sudu.

Berdasarkan hasil perhitungan yang disajikan dalam Tabel 3-1 sampai dengan Tabel 3-3 dapat dilihat bahwa pada defleksi sebesar 1.5 m pada ujung sudu mengakibatkan *losses* daya sekitar 50 %. Hubungan antara besar defleksi pada ujung sudu dan *losses* daya tidak linier sehingga defleksi sudu menjadi sensitif terhadap daya keluaran turbin angin.

3.5 Efek Diameter Efektif Terhadap Daya Keluaran

Pengurangan diameter efektif pada umumnya mengurangi daya keluaran turbin angin, terlepas dari bentuk sudu,

kecepatan putar, kecepatan angin, dan sebagainya. Hal tersebut sesuai dengan teori momentum yang menganggap sudu-sudu *swirl machine* sebagai sebuah *disc*. Semakin kecil diameter efektif turbin angin, maka semakin kecil pula energi yang dapat diserap oleh turbin angin.

3.6 Perhitungan Daya dan *Losses* Pada Kecepatan Angin 9 m/s

Dipilih kecepatan angin 9 m/s karena merupakan kecepatan angin pada kondisi *on design*

Analisis efek sudu yang terdefleksi pada kecepatan angin 9 m/s merupakan analisis pada kondisi desain. Dengan kata lain, pada bagian ini akan dilihat perbandingan daya dan efisiensi turbin angin ketika beroperasi pada kondisi desain dengan sudu *rigid* dan sudu yang terdefleksi. Hasil perhitungan disajikan dalam Tabel 3-1 s.d 3-3 dan Gambar 3-5 s.d 3-8.

Tabel 3-1: HASIL PERHITUNGAN PADA LENGKUNGAN POLINOMIAL PANGKAT 2

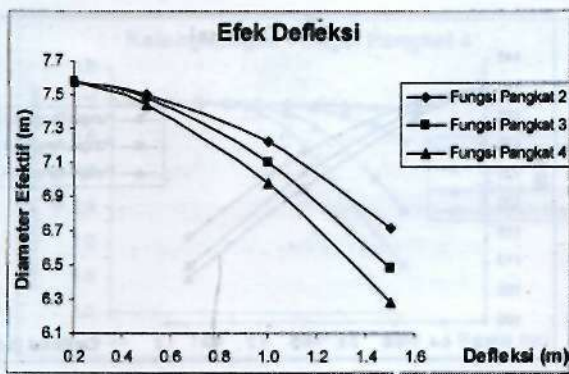
Defleksi	Diameter Efektif	Putaran	Daya	Losses
0.2 m	7.58 m	339 rpm	9233 W	1 %
0.5 m	7.50 m	333 rpm	8748 W	6 %
1.0 m	7.22 m	312 rpm	7211 W	23 %
1.5 m	6.72 m	277 rpm	5076 W	46 %

Tabel 3-2: HASIL PERHITUNGAN PADA LENGKUNGAN POLINOMIAL PANGKAT 3

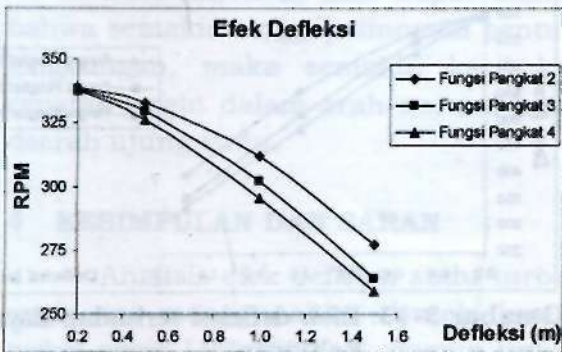
Defleksi	Diameter Efektif	Putaran	Daya	Losses
0.2 m	7.58 m	339 rpm	9206 W	1 %
0.5 m	7.48 m	330 rpm	8503 W	9 %
1.0 m	7.10 m	302 rpm	6545 W	30 %
1.5 m	6.48 m	264 rpm	4401 W	53 %

Tabel 3-3: HASIL PERHITUNGAN PADA LENGKUNGAN POLINOMIAL PANGKAT 4

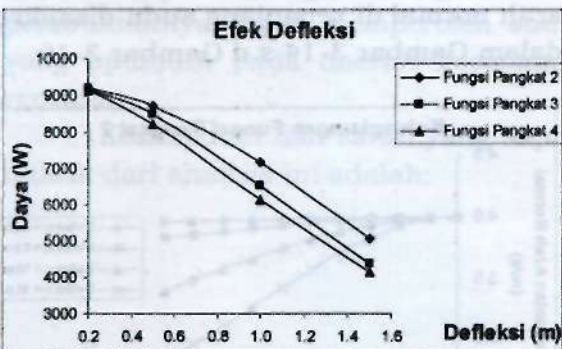
Defleksi	Diameter Efektif	Putaran	Daya	Losses
0.2 m	7.58 m	338 rpm	9147 W	2 %
0.5 m	7.44 m	326 rpm	8225 W	12 %
1.0 m	6.98 m	295 rpm	6135 W	34 %
1.5 m	6.28 m	259 rpm	4148 W	56 %



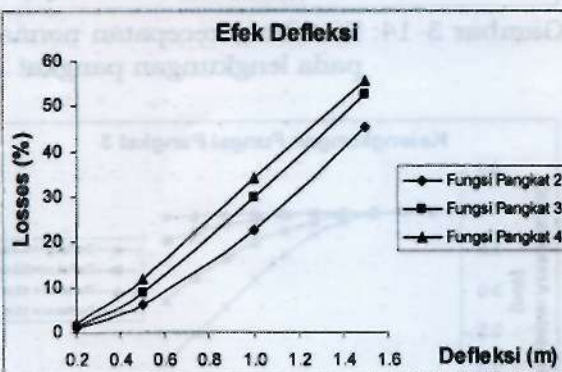
Gambar 3-5: Efek defleksi terhadap diameter efektif



Gambar 3-6: Efek defleksi terhadap RPM



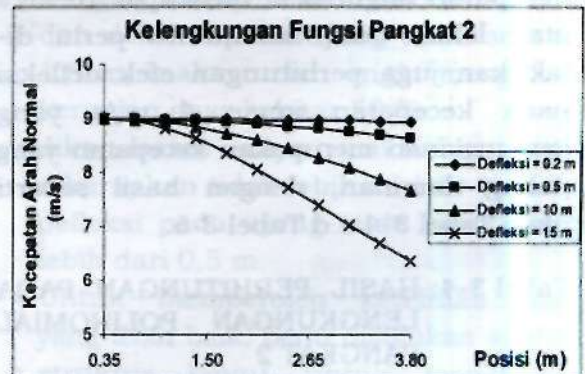
Gambar 3-7: Efek defleksi terhadap daya keluaran



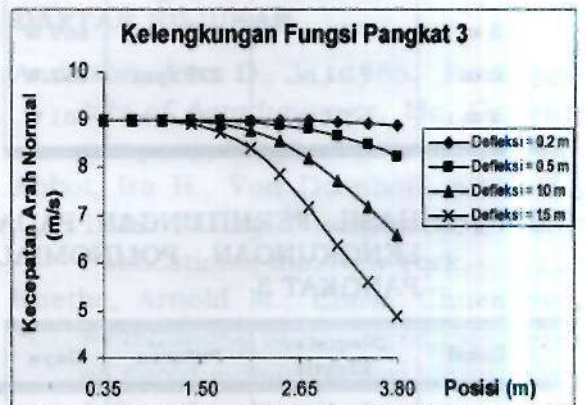
Gambar 3-8: Efek defleksi terhadap losses

Bervariasinya sudut defleksi di setiap penampang sudu menyebabkan

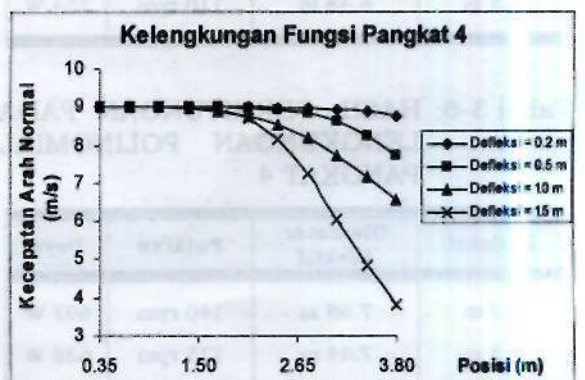
kecepatan angin yang dirasakan oleh setiap penampang sudu dalam arah normal juga akan bervariasi. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 3-9 s.d Gambar 3-11.



Gambar 3-9: Distribusi kecepatan normal pada lengkungan pangkat 2



Gambar 3-10: Distribusi kecepatan normal pada lengkungan pangkat 3



Gambar 3-11: Distribusi kecepatan normal pada lengkungan pangkat 4

Dari hasil di atas dapat dilihat bahwa efek pengurangan daya sangat bergantung besarnya defleksi dan bentuk lengkungan.

3.3 Perhitungan Daya Pada Kecepatan Angin 4 m/s

Kecepatan angin rata-rata di Indonesia adalah berkisar antara 4 m/s - 6 m/s. Hanya pada saat-saat tertentu saja kecepatan angin bisa mencapai 10 m/s atau lebih. Oleh karena itu perlu dilakukan juga perhitungan efek defleksi pada kecepatan angin 4 m/s yang kemungkinan merupakan kecepatan yang paling dominan, dengan hasil seperti pada Tabel 3-4 s.d Tabel 3-6.

Tabel 3-4: HASIL PERHITUNGAN PADA LENGKUNGAN POLINOMIAL PANGKAT 2

Defleksi	Diameter Efektif	Putaran	Daya
0.2 m	7.58 m	140 rpm	704 W
0.5 m	7.50 m	138 rpm	669 W
1.0 m	7.22 m	129 rpm	557 W
1.5 m	6.72 m	115 rpm	401 W

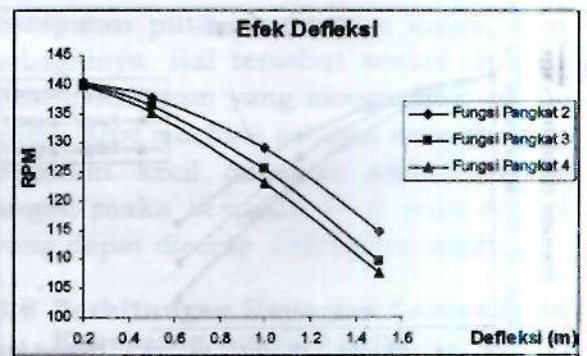
Tabel 3-5: HASIL PERHITUNGAN PADA LENGKUNGAN POLINOMIAL PANGKAT 3

Defleksi	Diameter Efektif	Putaran	Daya
0.2 m	7.58 m	140 rpm	702 W
0.5 m	7.48 m	136 rpm	650 W
1.0 m	7.10 m	125 rpm	513 W
1.5 m	6.48 m	110 rpm	354 W

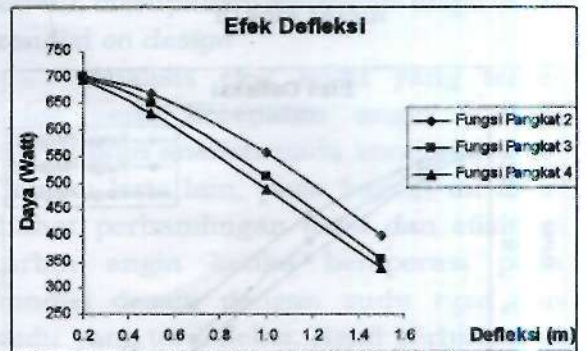
Tabel 3-6: HASIL PERHITUNGAN PADA LENGKUNGAN POLINOMIAL PANGKAT 4

Defleksi	Diameter Efektif	Putaran	Daya
0.2 m	7.58 m	140 rpm	697 W
0.5 m	7.44 m	135 rpm	633 W
1.0 m	6.98 m	123 rpm	487 W
1.5 m	6.28 m	108 rpm	337 W

Hasil dalam bentuk tabel di atas juga dapat disajikan dalam bentuk seperti pada Gambar 3-12 dan Gambar 3-13.

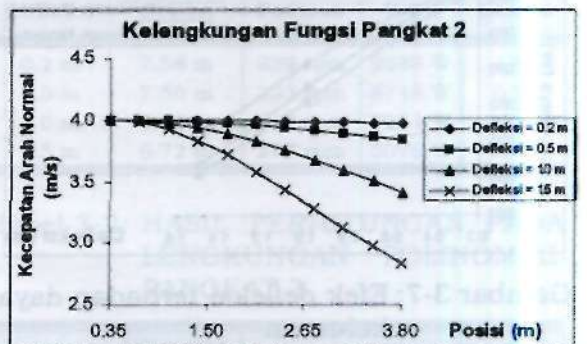


Gambar 3-12: Efek defleksi terhadap RPM

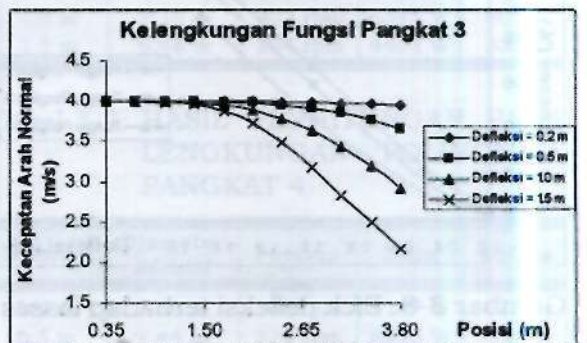


Gambar 3-13: Efek defleksi terhadap daya keluaran

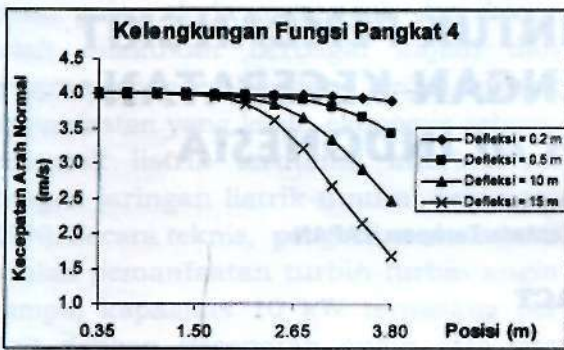
Distribusi kecepatan angin dalam arah normal di sepanjang sudu disajikan dalam Gambar 3-14 s.d Gambar 3-16.



Gambar 3-14: Distribusi kecepatan normal pada lengkungan pangkat 2



Gambar 3-15: Distribusi kecepatan normal pada lengkungan pangkat 3



Gambar 3-16: Distribusi kecepatan normal pada lengkungan pangkat 4

Dari kurva di atas dapat dilihat bahwa semakin tinggi polinomial bentuk lengkungan, maka semakin kecil kecepatan angin dalam arah normal pada daerah ujung sudu.

4 KESIMPULAN DAN SARAN

Analisis efek defleksi sudu turbin angin ini menggunakan contoh kasus turbin angin LPN 10000 E, namun untuk turbin-turbin yang lain perlu juga dilakukan analisis yang sama agar dalam pembuatannya dapat memperoleh sudu yang optimum pada daerah kecepatan rencana.

Kesimpulan dan saran yang dapat ditarik dari analisis ini adalah:

- Bentuk lengkungan sudu akibat ter-defleksi sangat mempengaruhi *losses* daya keluaran.
- Besarnya kerugian daya tidak linier terhadap besarnya defleksi.
- Dengan diameter awal sebesar 7.6 m dan defleksi pada ujung sudu sebesar 1.5 m, maka turbin angin mengalami kerugian daya sekitar 50 %.
- Jika *losses* daya maksimum yang diharapkan tidak lebih dari 10 % maka defleksi pada ujung sudu tidak boleh lebih dari 0,5 m.
- Untuk memperoleh ketelitian hasil yang lebih baik, perlu dilakukan analisis struktur lanjut untuk mengetahui bentuk lengkungan sudu dan perubahan distribusi sudut puntir.

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.