

# ANALISIS RADIUS AMAN AKIBAT KEGAGALAN STRUKTUR SUDU SKEA 50 KW PADA SAAT BEROPERASI

Sulistyo Atmadi\*), Ahmad Jamaludin Fitroh\*\*)

\*) Peneliti Bidang Konversi Energi Dirgantara, LAPAN

\*\*\*) Peneliti Aerodinamika, LAPAN

e-mail: sulistyo@hotmail.com

## ABSTRACT

Analysis on the safe radius of a blade structural failure during operation, is studied on this paper. The particular blade under analysis is the SKEA 50 kW LAPAN. The rotor is installed at 18 m height. The analysis is based on the modified straight motion and rotational momentum formulation. The result showed that at the maximum design rotational speed of 80 rpm, the blade would be thrown out of its centre to 73 m horizontally, and 35 m vertically above the ground. On the other hand, the failure at the root of the blade would be thrown and spinned at its centre of mass at the speed of 145 rpm.

Key words: *Radius of safety, Rotating blade, 50 kW WECS*

## ABSTRAK

Telah dilakukan analisa radius aman akibat kegagalan struktur sudu atau sudu patah pada saat beroperasi. Analisis dilakukan pada sudu SKEA 50 kW LAPAN. Rotor dipasang pada menara setinggi 18 m. Dengan menggunakan Modifikasi dari Gerak Lurus Berubah Beraturan dan Momentum Putar, hasil analisa menunjukkan bahwa jika sudu mengalami kegagalan struktur atau patah pada putaran rancangan atau maksimum 80 rpm, maka sudu akan terlempar maksimum sejauh 73 m ke samping dan 35 m ke atas dihitung dari permukaan tanah. Akibat patah di pangkal, sudu akan terlempar dan berputar pada titik beratnya dengan putaran 145 rpm.

Kata kunci: *Radius aman, Sudu berputar, SKEA 50 kW*

## 1 PENDAHULUAN

Turbin angin yang segera akan dipasang oleh LAPAN adalah SKEA 50 kW. Sesuai dengan namanya, maka turbin angin tersebut mempunyai kapasitas daya maksimum 50 kW (Ahmad J. Fitroh, 2009; Sulistyo Atmadi & Ahmad J. Fitroh, 2009).

Faktor keamanan adalah unsur utama dalam pengoperasian Turbin Angin. Faktor keamanan yang dimaksud adalah apabila terjadi kegagalan operasi turbin angin, maka pada radius daerah tertentu dari turbin angin dinyatakan sebagai daerah yang harus dihindari pada saat pengoperasian turbin angin.

Salah satu komponen utama SKEA 50 kW yang dapat menjadi

penyebab kecelakaan adalah rotor dengan tiga buah sudu. Penelitian teoritis menunjukkan bahwa dengan sudu rotor yang modern akan terjadi kecepatan aerodinamika yang kritis kira-kira tiga kali kecepatan ujung rancangan. Pada kecepatan angin yang konstan, ini berarti tiga kali kecepatan rotor (Milborrow, D.J. 1983). Apabila pada saat pengoperasian terjadi kegagalan struktur sudu, maka sudu akan terlempar. Dengan berat sekitar 230 kg per sudu, maka dampak yang akan diakibatkan apabila tertimpa sudu yang terlepas atau patah tersebut pasti sangat besar. Oleh karena itu perlu diperhitungkan daerah atau radius aman selama pengoperasian SKEA 50 kW sehingga

apabila terjadi sudu lepas atau patah, maka dalam radius tersebut tidak ada korban jiwa maupun harta.

### 1.1 Tujuan

Perhitungan dilakukan untuk mendapatkan radius aman selama pengoperasian SKEA 50 kW. Selain itu perhitungan dilakukan untuk mendapatkan karakteristik *sentrifugal failure* sudu. Radius aman diperlukan agar tidak terjadi korban jiwa dan harta selama pengoperasian. Karakteristik *sentrifugal failure* dihitung untuk mengetahui berapa kecepatan putar sudu terhadap titik beratnya pada saat terlempar.

### 1.2 Batasan Masalah

SKEA 50 kW yang sedang dikembangkan oleh LAPAN tersebut dirancang agar mampu menghasilkan daya sebesar 50 kW pada kecepatan angin 10 m/det dan putaran 80 rpm (Ahmad J. Fitroh, 2009; Sulistyono Atmadi & Ahmad J. Fitroh, 2009). Dengan kata lain generator turbin angin yang digunakan mempunyai putaran maksimum 80 rpm. Oleh karena itu dalam perhitungan ini, putaran rotor yang dipilih adalah 80 rpm.

Setiap sudu mempunyai berat 230 kg. Sudu tersebut diukur mempunyai titik berat pada posisi 2,407 m dihitung dari pangkal sudu. Apabila memperhitungkan jarak antara pangkal sudu dan sumbu putar rotor, maka titik berat sudu menjadi 2,907 m.

Rotor dipasang di atas menara setinggi 18 m. Dengan demikian titik pusat perhitungan berada pada ketinggian 18 m di atas permukaan tanah.

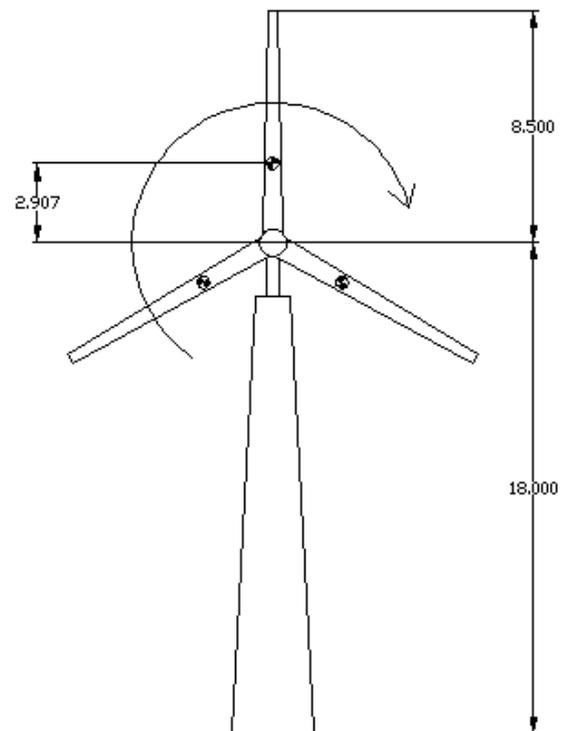
Pada saat sudu terlempar, terjadi gesekan antara permukaan sudu dengan udara. Analisis teoritis mengenai perhitungan panjang lintasan dengan mempertimbangkan gaya angkat dan hambat aerodinamika menghasilkan

bahwa suatu koefisien hambat udara rata-rata  $c_D = 0,25$  (Sorensen, J.N., 1980). Selain itu terjadi gaya hambat lainnya yang bekerja pada sudu sehingga dalam penelitian ini koefisien gaya hambat sudu,  $c_D$  diasumsikan sebesar 0,6. Asumsi tersebut dipilih karena pada gerakan yang terdiri banyak manuver, harga  $c_D$  menjadi cukup besar (Anderson, John D., Jr, 1985; Mc. Cormick, Barnes W., 1995).

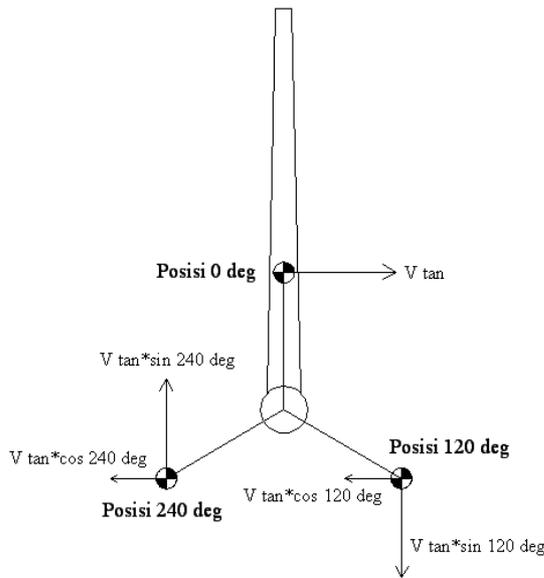
Penampang sudu berbentuk *airfoil*. Untuk menghitung distribusi massa sudu, maka distribusi luas *airfoil* perlu dihitung terlebih dahulu. Untuk mempermudah perhitungan, maka perhitungan luas *airfoil* diasumsikan sama dengan perhitungan luas belah ketupat, yaitu hanya memperhitungkan *chord* dan tebal *airfoil*.

## 2 DASAR TEORI DAN METODE

Dalam perhitungan radius aman akibat kegagalan rotor, titik berat sudu disajikan sebagai acuan. Sketsa turbin angin beserta sudunya disajikan dalam Gambar 2-1 dan 2-2 sebagai berikut:



Gambar 2-1: Sketsa SKEA 50 kW tampak depan



Gambar 2-2: Sketsa vektor kecepatan pada sudu

Gambar 2-2 menjelaskan vektor kecepatan pada sudu untuk tiga posisi, yaitu posisi 0, 120, dan 240 derajat.  $V_{tan}$  merupakan kecepatan tangensial yang mana merupakan fungsi dari putaran dan posisi titik berat terhadap sumbu putar rotor, sebagaimana dituliskan sebagai berikut:

$$V_{tan} = \omega R \tag{2-1}$$

dengan

$\omega$  = putaran (rad/det)

$R$  = posisi titik berat (m)

Untuk menentukan jangkauan perpindahan sudu dalam arah horisontal dan vertikal akibat patah pada saat operasional, maka kecepatan tangensial tersebut juga harus diuraikan dalam arah horisontal dan vertikal sebagai berikut:

$$V_x = V_{tan} * \cos \theta \tag{2-2a}$$

$$V_y = V_{tan} * \sin \theta \tag{2-2b}$$

dengan

$V_x$  = kecepatan tangensial dalam arah horisontal (m/det)

$V_y$  = kecepatan tangensial dalam arah vertikal (m/det)

$\theta$  = posisi sudu (derajat)

Pada saat terlempar, sudu akan mendapatkan gaya hambat udara. Besar gaya hambat tersebut secara langsung dipengaruhi oleh koefisien gaya hambat itu sendiri dan kecepatan, seperti pada persamaan (2-3) di bawah ini (Anderson, John D., Jr, 1985; Mc. Cormick, Barnes W., 1995).

$$d = \frac{1}{2} \rho V^2 A c_D \tag{2-3}$$

dengan  $\rho$  dan  $A$  masing – masing adalah kerapatan udara dan luas sudu. Kerapatan udara disesuaikan dengan kondisi pengujian. Luas sudu yang digunakan adalah luas permukaan sudu. Dalam pengerjaan ini luas permukaan sudu disederhanakan menjadi

$$A = \frac{1}{2} (c_r + c_t) b \tag{2-4}$$

dengan

$c_r$  = chord di pangkal (*root*)

$c_t$  = chord di ujung (*tip*)

$b$  = panjang sudu

Notasi  $V$  dalam persamaan (2-3) merupakan kecepatan translasi sudu pada saat terlempar. Harga  $V$  diperoleh dari persamaan (2-2).

Selain dalam bentuk satuan sudut, posisi sudu pada saat patah juga dapat disajikan dalam bentuk ketinggian. Rotor dipasang pada menara setinggi 18 m sehingga posisi sudu yang sebenarnya merupakan penjumlahan dari ketinggian menara dan posisi sudu pada saat berputar. Posisi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$h = h_m + R * \cos \theta \tag{2-5}$$

dengan

$h$  = ketinggian sudu dihitung dari permukaan tanah (m)

$h_m$  = tinggi menara (m)

Metode yang digunakan untuk menghitung ketinggian dan jarak terlempar

maksimum sudu setelah patah adalah persamaan Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB). Persamaan tersebut diaplikasikan dalam arah vertikal dan mendatar sebagai berikut:

$$y = h + V_y t - \frac{1}{2} g \left( \frac{mg - D_y}{m} \right) t^2 \quad (2-6)$$

$$x = V_x t - \frac{1}{2} \frac{D_x}{m} t^2 \quad (2-7)$$

dengan

y = ketinggian maksimum (m)

x = perpindahan ke samping maksimum (m)

t = waktu yang diperlukan untuk mencapai ketinggian maksimum (det)

g = percepatan gravitasi bumi (m/det<sup>2</sup>)

D<sub>y</sub> = gaya hambat dalam arah vertikal (N)

D<sub>x</sub> = gaya hambat dalam arah mendatar (N)

Harga y dan x di atas berlaku untuk setiap harga θ pada saat sudu patah. Dengan memvariasikan harga θ, maka akan diperoleh radius maksimum untuk daerah aman pada saat pengujian sudu. Akibat adanya distribusi kecepatan tangensial di sepanjang sudu sesaat setelah sudu patah pada pangkalnya, akan membentuk momentum putar pada sudu. Adanya momentum putar tersebut menyebabkan sudu berputar terhadap titik beratnya sendiri pada saat terlempar. Sketsa distribusi kecepatan tangensial tersebut disajikan dalam Gambar 2-3.

Momentum putar per elemen sudu dipengaruhi oleh distribusi massa, kecepatan tangensial, dan posisi elemen terhadap titik berat sudu. Perumusan momentum putar per elemen sudu dapat dituliskan sebagai berikut:

$$dM = dm * V_{tan} * x \quad (2-8)$$

dengan

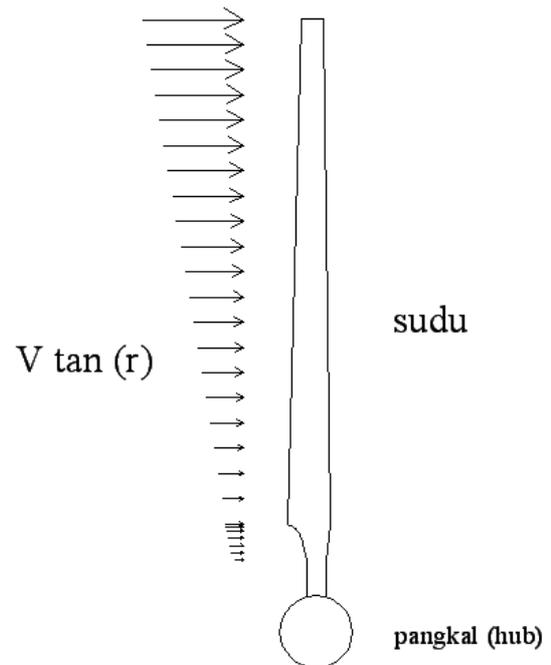
dM = momentum putar per elemen

dm = massa per elemen

x = jarak antara elemen ke c.g.

Harga x pada persamaan (2-8) di atas dapat berharga positif maupun negatif, tergantung dari arah referensinya. Momentum putar sudu diperoleh dari penjumlahan momentum putar per elemennya sebagai berikut:

$$M = \sum dM \quad (2-9)$$

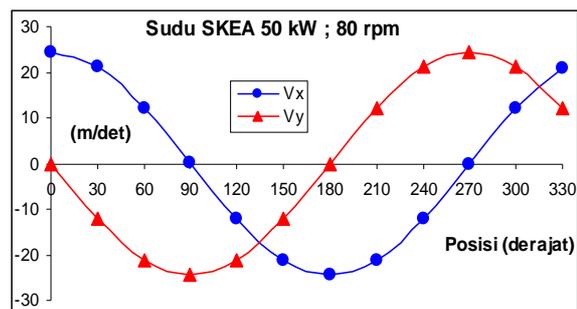


Gambar 2-3: Sketsa distribusi kecepatan tangensial

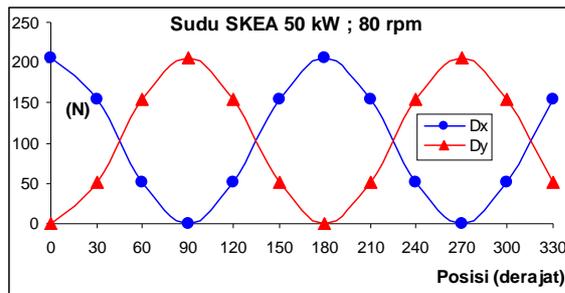
### 3 HASIL ANALISA DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Radius Aman

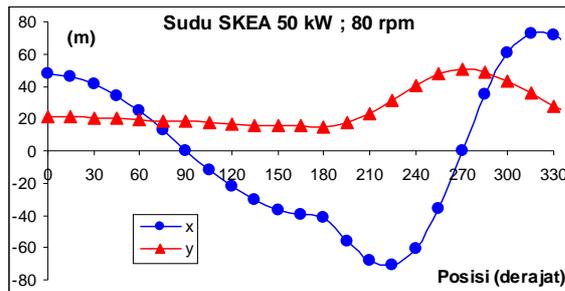
Dalam analisa ini posisi sudut sudu divariasikan dari 0 hingga 330 derajat dengan kelipatan 15 derajat. Hasil proses perhitungan untuk mendapatkan radius aman disajikan dalam Gambar 3-1 berikut ini:



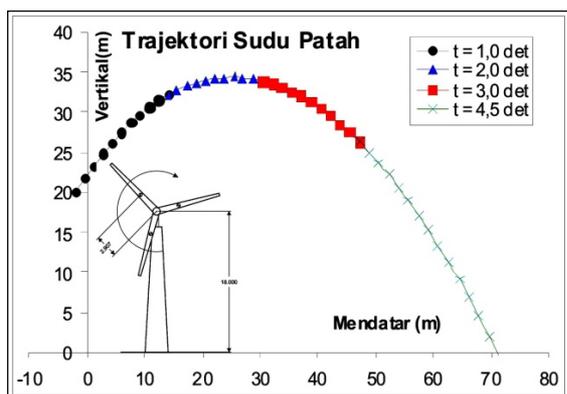
Gambar 3-1a: Hasil perhitungan kecepatan awal terlempar



Gambar 3-1b: Hasil perhitungan gaya hambat



Gambar 3-1c: Jarak lontar



Gambar 3-1d: Trayektori sudu terlempar

Gambar 3-1a menyajikan hasil perhitungan kecepatan awal sudu terlempar. Harga positif dan negatif untuk  $V_x$  hanya merupakan perbedaan gerak ke kanan dan kiri. Demikian juga pada harga  $V_y$ , harga positif dan negatif hanya menunjukkan perbedaan gerak ke atas dan ke bawah pada saat pangkal sudu patah.

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa misalnya sudu patah saat berada pada posisi 0 derajat yaitu tepat pada posisi vertikal ke atas, maka sudu akan mempunyai kecepatan awal terlempar ke arah kanan atau mendatar sebesar 24 m/det.

Gambar 3-1b menyajikan hasil perhitungan gaya hambat sudu pada

saat terlempar. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa misalnya sudu patah saat berada pada posisi 90 derajat yaitu tepat pada posisi mendatar ke kanan, maka sudu hanya mendapatkan gaya hambat dalam arah vertikal saja sebesar 206 N.

Gambar 3-1c menyajikan hasil perhitungan jarak lontar sudu pada saat terlempar. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa misalnya sudu patah saat berada pada posisi 180 derajat yaitu tepat pada posisi vertikal ke bawah, maka sudu akan terlontar ke kiri sejauh 41 m. Harga 15 m pada kolom y (arah vertikal) bukan berarti sudu terlontar sejauh 15 m ke atas, namun angka tersebut merupakan posisi sudu terhadap tanah mengingat rotor dipasang pada menara setinggi 18 m.

Posisi sudu pada saat terjadi kerusakan/patah, mempengaruhi jarak sudu terlempar. Dengan menggunakan prinsip balistik sederhana, dapat diketahui bahwa posisi sudu patah pada posisi  $315^\circ$  akan menghasilkan jarak lempar yang terjauh (Erich Hau, 2006).

Gambar 3-1d memperlihatkan bahwa jarak lempar dalam arah mendatar maksimal sebesar 73 m ke kanan pada posisi 315 derajat saat sudu patah. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa radius aman SKEA 50 kW pada putaran desain rotor 80 rpm adalah sebesar 73 m dan hal tersebut terjadi jika sudu patah pada posisi 315 derajat sesuai dengan prediksi.

Radius aman sejauh 73 m sebenarnya tergolong kecil. Hal tersebut disebabkan oleh putaran rotor yang kecil. Jika sebuah turbin angin tidak menggunakan sistem roda gigi (*gear box*) sebagai penghubung antara rotor dan generator maka semakin besar kapasitas turbin angin tersebut, semakin besar diameter rotor yang diperlukan. Dengan adanya batasan harga *Tip Speed Ratio* maka semakin besar diameter rotor, semakin lambat putarannya (David M. Eggleston & Forrest S. Stoddard, 1987; Erich Hau, 2006; Tony Burton, et al., 2001). Dengan kata lain semakin besar

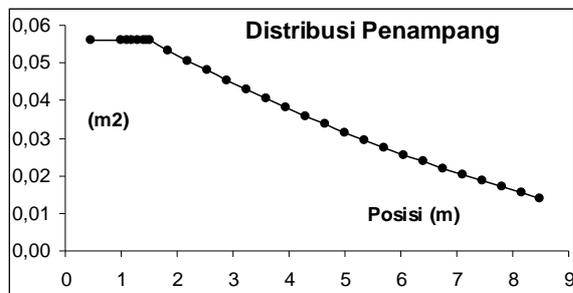
kapasitas turbin angin, maka semakin kecil radius aman yang diperlukan. Namun yang perlu diingat bahwa semakin besar kapasitas turbin angin, biasanya sudu yang digunakan semakin berat sehingga momentum yang dibawa oleh setiap sudu juga menjadi besar.

### 3.2 Putaran Sudu Saat Terlempar

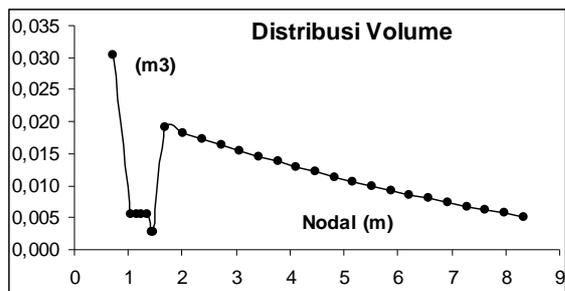
Sudu SKEA 50 kW secara umum mempunyai data geometri:

- Diameter rotor = 17,00 m
- Chord di pangkal = 0,70 m
- Chord di ujung = 0,35 m

Hasil perhitungan luas *airfoil* persegmen dan distribusi volumenya disajikan dalam Gambar 3-2 berikut ini.

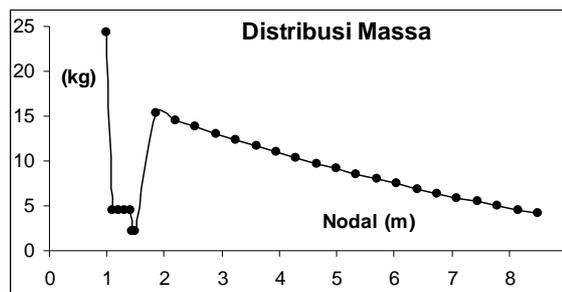


Gambar 3-2a: Distribusi penampang sudu



Gambar 3-2b: Distribusi volume sudu

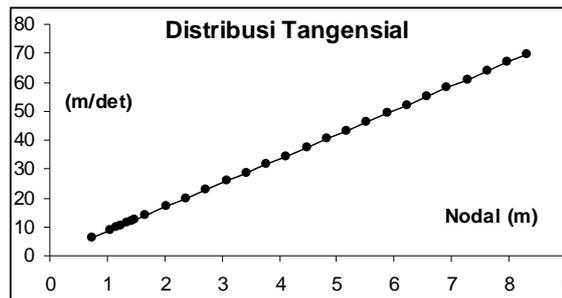
Dengan menjumlahkan distribusi volume di sepanjang sudu, maka diperoleh volume sudu sebesar 0,287 m<sup>3</sup>. Dengan menggunakan data berat sudu 230 kg, maka diperoleh rapat jenis sudu sebesar 802 kg/m<sup>3</sup>. Dengan mengasumsikan rapat jenis sudu konstan di sepanjang sudu, maka distribusi berat sudu menjadi seperti pada Gambar 3-3 berikut ini:



Gambar 3-3: Distribusi massa

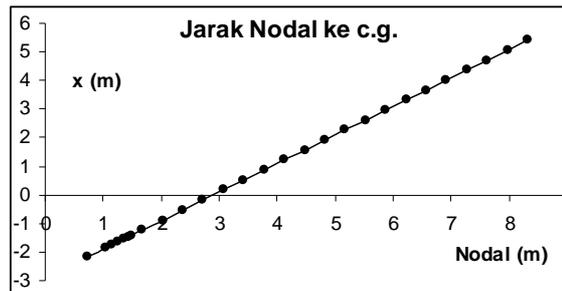
Pada paragraf sebelumnya telah diasumsikan bahwa rapat jenis sudu konstan di sepanjang sudu. Oleh karena itu distribusi massa pada Gambar 3-3 akan sebanding dengan distribusi volume pada Gambar 3-2b.

Pada kondisi putaran konstan, kecepatan tangensial di setiap segmen hanya bergantung pada posisi nodal segmen terhadap sumbu putar rotor. Distribusi kecepatan tangensial di setiap segmen disajikan dalam Gambar 3-4 di bawah ini.



Gambar 3-4: Distribusi kecepatan tangensial

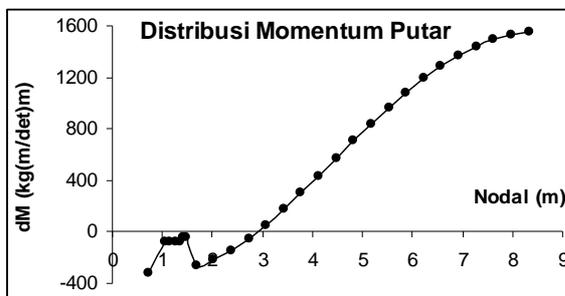
Pada Sub Bab Batasan Masalah telah disebutkan bahwa titik berat sudu berada pada posisi 2,907 m dihitung dari sumbu putar rotor. Dengan demikian jarak antara nodal setiap segmen terhadap titik berat sudu adalah sebagai berikut:



Gambar 3-5: Jarak nodal ke titik berat sudu

Jarak nodal ke titik berat sudu pada Gambar 3-5 di atas ada yang berharga positif dan negatif. Perbedaan tanda harga tersebut nantinya berpengaruh pada arah momentum putar.

Perumusan momentum putar yang digunakan dalam Persamaan (2-8) merupakan fungsi dari distribusi massa, kecepatan tangensial, dan jarak antara nodal ke titik berat sudu. Ketiga parameter tersebut telah disajikan masing-masing dalam Gambar 3-3, Gambar 3-4, dan Gambar 3-5. Dengan memasukkan ketiga parameter tersebut dalam Persamaan (2-8), maka diperoleh distribusi momentum putar seperti pada Gambar 3-6 di bawah ini.



Gambar 3-6: Distribusi momentum putar

Sesuai dengan kondisi operasional sistem turbin angin maka apabila dilihat dari arah depan, rotor akan berputar searah jarum jam (David M. Eggleston & Forrest S. Stoddard, 1987; Erich Hau, 2006; Tony Burton, et al., 2001). Distribusi momentum putar pada Gambar 3-6 menunjukkan bahwa pada daerah pangkal sebelum titik berat sudu, momentum putarnya berharga negatif. Hal tersebut menandakan bahwa pada daerah tersebut setiap elemen sudu memaksa sudu untuk berputar berlawanan arah jarum jam, demikian juga sebaliknya. Dengan menjumlahkan distribusi momentum putar tersebut maka diperoleh momentum putar untuk setiap sudu pada saat patah di pangkal sebesar 13.633 kg.(m/det).m. Harga tersebut bersesuaian dengan putaran sudu terhadap titik beratnya sendiri searah jarum jam sebesar 145 rpm.

#### 4 KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat ditarik dari analisa ini adalah bahwa radius

aman untuk pengujian SKEA 50 kW cukup kecil, yaitu hanya sekitar 73 m. Selain itu kecepatan jatuhnya sudu juga tidak terlalu besar karena putaran rotor yang kecil. Namun tetap perlu diingat bahwa sudu rotor SKEA 50 kW sangat berat sehingga dampak yang diakibatkan jika menabrak sesuatu dapat berakibat fatal.

Selain radius aman, juga dihitung putaran sudu pada saat terlempar akibat patah pada pangkalnya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sudu berputar terhadap titik beratnya sendiri sebesar 145 rpm.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Ahmad J. Fitroh, 2009. *Perancangan dan Analisis Aerodinamika Sudu SKEA 50 kW*, LAPAN, Bogor.
- Anderson, John D., Jr, 1985. *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc. Graw Hill company, Singapore.
- David M. Eggleston & Forrest S. Stoddard, 1987. *Wind Turbine Engineering Design*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Erich Hau, 2006. *Wind Turbine Fundamentals, Technologies, Application, and Economics*, Springer, Berlin.
- Mc. Cormick, Barnes W., 1995. *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Performance*, John Wiley & Sons, Canada.
- Milborrow, D.J. 1983. *Wind Turbine Runaway Speed*, 5. BWEA Wind Energy Conference, Reading, U.K.
- Sorensen, J.N., 1980. *Calculation of Trajectories of Detached Wind Turbine Blades and Prediction of Side Risk Levels Associated with Failures of HAWT'S*, IEA-Expert-Meeting, Munich.
- Sulistyo Atmadi & Ahmad J. Fitroh, 2009. *Efek Penambahan Sudut Pitch Terhadap Kurva Daya SKEA 50 kW*, LAPAN, Bogor.
- Tony Burton, et al., 2001. *Wind Energy Hand Book*, John Wiley & Sons.