

PENYEDERHANAAN GEOMETRI SUDU TURBIN ANGIN UNTUK KEMUDAHAN PROSES PRODUKSI

Sulistyo Atmadi*, Ahmad Jamaludin Fitroh**

*Bidang Konversi Energi Dirgantara, LAPAN, Rumpin, Bogor, Indonesia

**Departemen Teknik Penerbangan, ITB, Bandung, Indonesia

e-mail: sulistyoa@indosat.net.id

ABSTRAK

Pada umumnya sudu turbin angin dirancang untuk memberikan daya yang maksimum sehingga mempunyai bentuk yang rumit. Untuk kepentingan kemudahan proses produksi, biasanya dilakukan penyederhanaan bentuk sudu namun penyederhanaan tersebut dapat mengurangi prestasi aerodinamika sudu. Untuk mengetahui seberapa besar pengurangan prestasi yang terjadi, maka dilakukan penelitian dan analisis prestasi aerodinamis sudu akibat penyederhanaan geometri sudu dengan cara antara lain pengabaian puntiran, penyeragaman distribusi *chord*, maupun kombinasi puntiran dan penyeragaman *chord*. Melalui penelitian studi kasus sudu 50 kW buatan LAPAN yang menggunakan *Blade Elemen-Momentum Theory*, diperoleh penurunan prestasi daya sebesar 6,8 %, 6,5 %, dan 5,1 % berturut-turut untuk pengabaian puntiran, penyeragaman distribusi *chord*, dan kombinasi keduanya. Ini berarti penyederhanaan geometri sudu dapat dilakukan untuk kemudahan dan penghematan biaya produksi. Namun penyederhanaan geometri sudu juga mempengaruhi kemampuan *start-up*.

Kata kunci: turbin angin, sudu, penyederhanaan geometri.

ABSTRACT

Wind turbine is normally designed to give a maximum power output and therefore typically producing a rather complicated blade shape. However, for easier production, a simpler blade-shape is preferred even though there will be a losses in aerodynamic performances. In order to asses this aerodynamic loss, a study has been conducted to see the effect of simplification in blade geometry such as twist, uniformity of chord distribution and combination of twist and uniformity chord. A study case using LAPAN wind turbine of a 50 kW and based on the blade element momentum theory give a performance losses of 6,8 %, 6,5 %, and 5,1 % for the twist, uniform chord distribution and its combination respectively. This means the blade shape simplification of 50 kW LAPAN wind turbine is justifiable. However, this simplification is affecting the start-up performance of the wind turbine.

Keyword: wind turbine, blade, geometry simplification.

1. PENDAHULUAN

Pada umumnya sudu turbin angin dirancang untuk memberikan prestasi aerodinamika yang maksimum sehingga akan mempunyai bentuk yang rumit [De Renzo, 1979; Burton et al., 2001]. Prestasi aerodinamika sudu biasanya dinyatakan dalam bentuk koefisien daya (*coeficient of power*) dan dituliskan sebagai c_p [Burton et al., 2001]. Sebuah sudu dikatakan mempunyai prestasi aerodinamika yang bagus apabila mampu menghasilkan daya sebesar mungkin dengan diameter rotor dan kecepatan angin yang sekecil mungkin. Konsekuensinya adalah geometri sudu yang diperlukan menjadi lebih rumit, yaitu akan memerlukan puntiran (*twist*), distribusi *chord* (*tapered*), dan penggunaan aerofoil yang sesuai dan bagus.

Sudu yang telah dirancang kemudian diproduksi. Keberhasilan produksi sudu secara umum dipengaruhi oleh kemampuan (*technical skill*), ketersediaan alat, dan ketersediaan bahan. Apabila alat yang digunakan terbatas, maka akan terjadi kesulitan dalam membuat puntiran pada sudu. Sudu yang dibuat pejal akan menghabiskan bahan yang tidak sedikit sehingga jumlah bahan yang akan digunakan juga harus diperhitungkan. Sudu dengan bentuk *tapered* cenderung menghabiskan bahan yang lebih banyak. Apabila jumlah bahan terbatas, maka pemilihan bentuk sudu dengan distribusi *chord* yang seragam dapat menjadi alternatif.

Penyederhanaan bentuk geometri sudu dengan pengabaian puntiran (*untwist*), distribusi *chord* yang seragam (*rectangular*), maupun keduanya (*untwist-rectangular*) dapat meningkatkan atau menurunkan prestasi sudu.

Apabila sudu dirancang agar menghasilkan prestasi yang optimal tanpa memperhitungkan kemampuan produksi dan ketersediaan bahan, maka penyederhanaan geometri akan menurunkan prestasi aerodinamika sudu.

2. DASAR TEORI

Pada umumnya sudu dirancang agar menghasilkan daya tertentu pada kecepatan angin tertentu. Parameter lainnya yang saling berhubungan antara lain pemilihan aerofoil sebagai penampang sudu, diameter rotor, dan kecepatan putar rotor (RPM). Dengan kata lain secara umum *requirement* rancangan sudu turbin angin adalah sebagai berikut [Burton et al., 2001] :

- Daya keluaran sudu (*rated power*)
- Kecepatan angin (*rated wind speed*)
- Kecepatan putar rotor (RPM) pada *rated power* dan *rated wind speed*
- Diameter rotor (D_R) dan radius rotor (R)
- Aerofoil sebagai penampang sudu

Apabila data generator berupa torsi awal dan RPM maksimum diketahui, maka *requirement* tambahannya adalah

- Kecepatan angin *start-up* (*start-up wind speed*)
- Kecepatan angin *cut-in* (*cut-in wind speed*)
- Kecepatan angin *cut-out* (*cut-out wind speed*)

Hasil awal yang didapat dari rancangan sudu adalah

- Distribusi puntiran
- Distribusi *chord*

Selain sebagai hasil rancangan, distribusi *chord* juga dapat digunakan sebagai *requirement*. Pemilihan distribusi *chord* biasanya dipengaruhi oleh kedudukan sambungan sudu-generator, material, dan kekuatan sudu.

Apabila data generator berupa kurva kecepatan putar generator terhadap daya diketahui, maka hasil akhir dari rancangan sudu adalah kurva daya, yaitu kurva yang menggambarkan hubungan antara kecepatan angin dan daya.

Apabila koefisien daya c_p diasumsikan konstan terhadap kecepatan angin, maka kurva daya akan berbentuk polinomial pangkat tiga. Hal tersebut didasarkan pada definisi c_p secara matematik sebagai berikut :

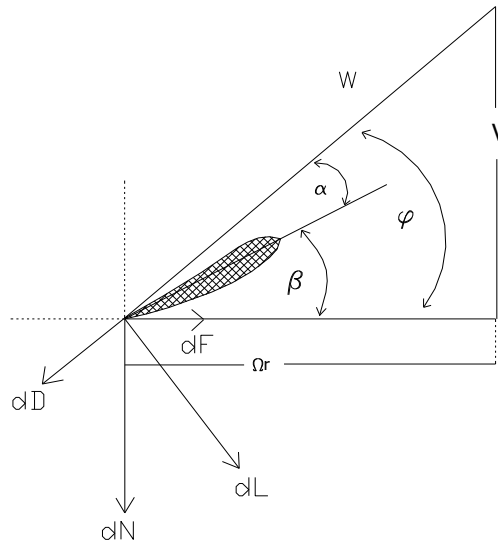
$$c_p = \frac{P}{\frac{1}{8} \rho \pi D_R^2 V^3} \tag{1}$$

- dengan
- P = daya (Watt)
 - ρ = kerapatan udara (kg/m^3)
 - D_R = diameter rotor (m)
 - V = kecepatan angin (m/det)

Metode yang digunakan untuk perancangan dan analisis sudu turbin angin pada penelitian kali ini adalah Metode Elemen Sudu-Momentum (*Blade Elemen-Momentum Theory*), yaitu penggabungan antara Metode Elemen Sudu (*Blade Elemen Theory*) dan Metode Momentum (*Momentum Theory*).

2.1. Metode Elemen Sudu

Metode Elemen sudu tidak memperhitungkan pengurangan kecepatan angin setelah melewati sudu. Metode ini mempunyai prinsip yang sama dengan analisis sebuah aerofoil, yaitu menggambarkan diagram kecepatan dan gaya seperti pada sketsa berikut [Gostelow, 1984; Mc. Cormick, 1995] :



Gambar 1. Sketsa arah gaya dan kecepatan pada Metode Elemen Sudu

- dengan
- L = gaya angkat (N/m)
 - D = gaya hambat (N/m)
 - F = gaya putar (N/m)
 - N = gaya aksial (N/m)
 - V = kecepatan angin (m/det)
 - w = kecepatan relatif (m/det)
 - Ω = kecepatan putar (rad/det)
 - r = jarak dari sumbu putar rotor ke elemen sudu (m)
 - α = sudut serang (derajat)
 - β = sudut pasang / sudut puntir (derajat)
 - φ = sudut aliran (derajat)

Gaya angkat, dL dan gaya hambat, dD yang dikonversikan dalam arah tangensial akan menghasilkan gaya putar, dF sebagai berikut :

$$dF = dL \sin \varphi - dD \cos \varphi \tag{2}$$

dengan [Anderson, 1985]:

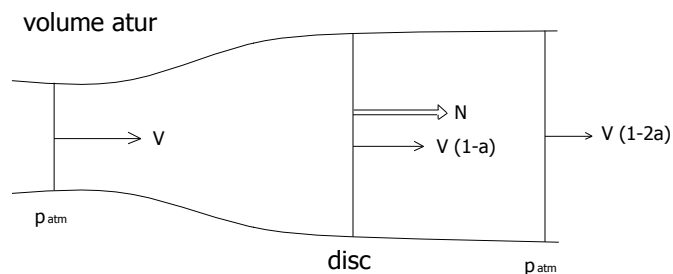
$$dL = \frac{1}{2} \rho w^2 c c_l \tag{3}$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho w^2 c c_d \tag{4}$$

- c = chord (m)
- c_l = koefisien gaya angkat
- c_d = koefisien gaya hambat

2.2. Metode Momentum

Metode ini menerapkan hukum kekekalan massa dan momentum. Volume atur dan sketsa kecepatan pada metode ini disajikan sebagai berikut [Larrabee, 1979; Mc. Cormick, 1995] :

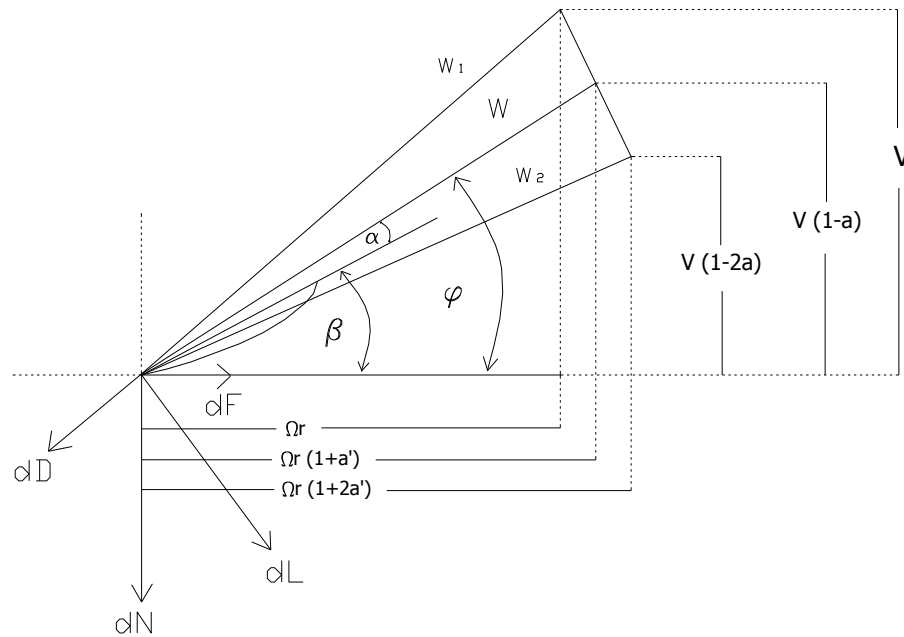


Gambar 2 Sketsa volume atur pada Metode Momentum

Angin pada posisi jauh di depan sudu turbin angin mempunyai kecepatan V dan tekanan p_{atm} . Setelah melalui sudu dan berada tepat di belakang sudu kecepatan angin mengalami penurunan kecepatan sebesar a sehingga menjadi $V(1-a)$. Pengurangan kecepatan sebesar a ini disebut sebagai *slip stream*. Metode ini mengasumsikan bahwa kecepatan angin tepat di depan dan di belakang sudu adalah sama, yaitu $V(1-a)$.

2.3 Metode Elemen Sudu-Momentum

Metode ini merupakan gabungan antara Metode Elemen Sudu dan Metode Momentum. Dengan kata lain metode ini merupakan modifikasi Metode Elemen Sudu dengan memasukkan parameter *slip stream*, a dari Metode Momentum sehingga menghasilkan diagram gaya dan kecepatan sebagai berikut :



Gambar 3 Sketsa arah gaya dan kecepatan pada Metode Elemen Sudu-Momentum

Untuk mendapatkan harga dF , persamaan (2) masih dapat digunakan. Perkalian antara r dan dF menghasilkan elemen torsi,

$$dQ = rdF \tag{5}$$

Akumulasi torsi dari setiap elemen sudu menghasilkan torsi total sudu,

$$Q = B \int dQ \tag{6}$$

dimana B adalah jumlah sudu

Daya keluaran sudu didapat dari perkalian antara kecepatan putar dan torsi total sudu sebagai berikut :

$$P = \Omega Q \quad (7)$$

Setelah daya keluaran didapat, maka c_p dapat dihitung menggunakan persamaan (1)

3. RANCANGAN DAN MODIFIKASI

3.1. Rancangan Sudu

Pada penelitian kali ini, studi kasus yang dipilih adalah rancangan sudu turbin angin 50 kW. Beberapa *requirement* atau masukan yang diberikan adalah

- P = 50 kW
- Kecepatan putar rotor = 100 RPM
- V_{rated} = 10 m/det

Pemilihan aerofoil dilakukan selain pada LS series juga pada NACA series [Abbot and Von Doenhoff, 1959] dan yang dipilih adalah *LS (1) - 0417 Mod.* Pemilihan didasarkan pada ketebalan dan prestasi c_l/c_d yang cukup baik

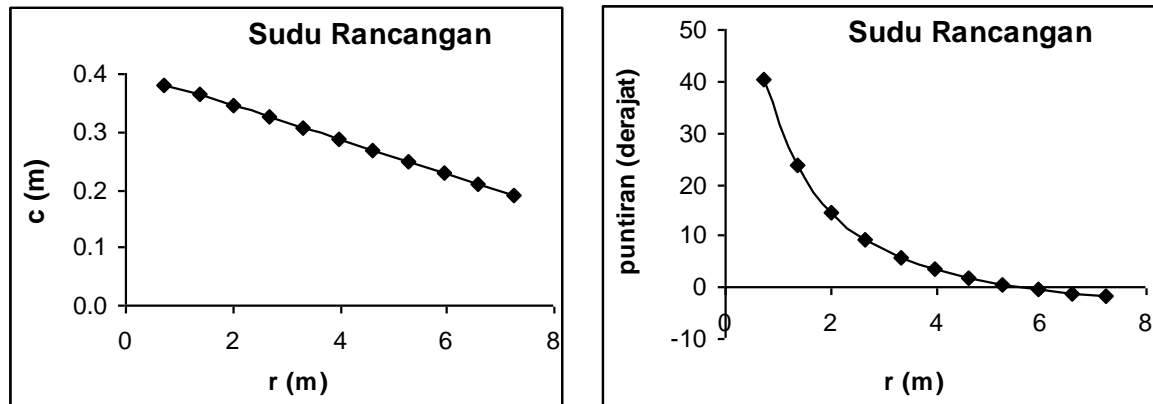
Untuk mencapai prestasi yang optimal, maka kondisi *Betz* digunakan [Glauert, 1935; Larrabee, 1979]. Maksudnya adalah untuk mencapai efisiensi yang maksimum, maka *slip stream* dipilih berharga konstan di sepanjang span sudu.

Distribusi *chord* dipilih *tapered* secara linier dengan *chord* pangkal sebesar 38 cm dan *chord* ujung sebesar 19 cm. Diameter pangkal dipilih 10% diameter rotor. Jumlah sudu dipilih sebanyak tiga buah.

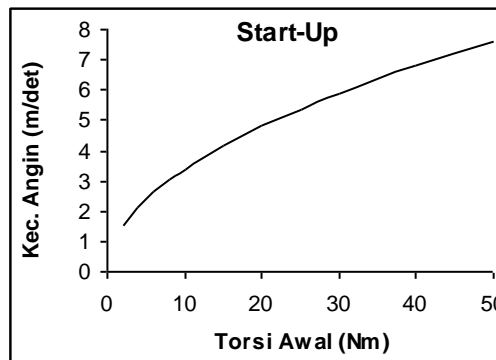
Setelah dihitung menggunakan alur yang terintergrasi, maka sudu hasil rancangan mempunyai spesifikasi:

- Daya keluaran, P = 50 kW
- Kecepatan putar = 100 RPM
- Kecepatan angin, V_{rated} = 10 m/det
- Jumlah sudu, B = 3
- Diameter rotor = 14,46 m
- Diameter pangkal = 1,45 m
- *Tip speed ratio*, λ = 7,57
- Koefisien daya, c_p = 0,51

Distribusi *chord* dan sudut puntir ditunjukkan dalam **Gambar 4**. Kemampuan *start-up* ditunjukkan dalam **Gambar 5**



Gambar 4 Distribusi *chord* dan puntiran sudu hasil rancangan



Gambar 5 Kemampuan *start-up* sudu hasil rancangan

Torsi awal pada gambar di atas menunjukkan torsi awal yang harus dihasilkan oleh sudu supaya generator dapat mulai berputar dari posisi diam. Kecepatan angin *start-up* dihitung dengan mengasumsikan sudu sebagai pelat sehingga besarnya hanya dipengaruhi oleh distribusi *chord* dan puntiran.

3.2 Modifikasi Sudu

Sudu hasil modifikasi yang dibahas pada penelitian kali ini adalah:

- Sudu *untwist*, yaitu sudu tanpa puntiran
- Sudu *rectangular*, yaitu distribusi *chord* konstan sepanjang sudu
- Sudu *untwist rectangular*, yaitu sudu tanpa puntiran dengan *chord* konstan

Sudut pasang sudu pada sudu *untwist* diambil pada 70% radius sudu [Gostelow, 1984], yaitu sebesar 1° . Panjang *chord* pada sudu *rectangular* diambil dari rata-rata *chord* sudu, yaitu 29 cm

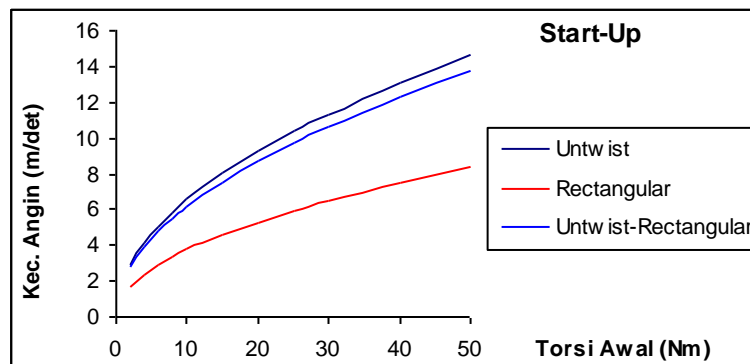
Setelah dihitung menggunakan alur yang terintegrasi, maka prestasi sudu modifikasi ditampilkan dalam **Tabel 1**.

Penurunan daya (*Power Drop*) dihitung berdasarkan daya sudu rancangan 50 kW.

Kemampuan *start-up* sudu modifikasi disajikan dalam **Gambar 6**.

Tabel 1 Prestasi sudu modifikasi

Sudu	P (kW)	c_p	Penurunan Daya (%)
<i>untwist</i>	47,12	0,47	6,78
<i>rectangular</i>	47,27	0,47	6,48
<i>untwist rectangular</i>	47,99	0,48	5,05



Gambar 6 Kemampuan *start-up* sudu modifikasi

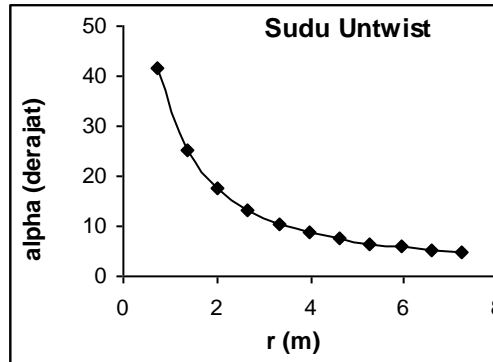
Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat bahwa kemampuan *start-up* yang paling baik adalah sudu *rectangular*. Hal tersebut ditandai dengan kecepatan angin *start-up* yang paling kecil untuk torsi awal yang sama.

4. ANALISIS PENGARUH PENYEDERHANAAN GEOMETRI SUDU

4.1 Analisis Sudu *Untwist*

Prestasi sudu modifikasi dalam Tabel 1 memperlihatkan bahwa pengabaian puntiran menyebabkan penurunan daya sebesar 6,78% pada kecepatan angin 10 m/det dan kecepatan

putar sudu 100 RPM. Pada sudut pasang atau sudut puntir konstan sebesar 1^0 , maka pada kondisi *rated* terjadi *stall* pada daerah pangkal. Hal tersebut dapat dilihat pada distribusi sudut serang, α yang ditampilkan dalam **Gambar 7**.



Gambar 7 Distribusi sudut serang sudu *untwist*.

Aerofoil *LS (1) – 0417 Mod* akan mengalami *stall* pada sudut serang sekitar 15^0 . Oleh karena itu penurunan daya yang diakibatkan oleh *stall* terjadi pada daerah sekitar 30 % radius rotor.

4.2 Analisis Sudu *Rectangular*

Sudu *rectangular* mempunyai *chord* konstan sebesar 29 cm. Dengan kata lain pada daerah ujung, sudu *rectangular* mempunyai *chord* yang lebih besar daripada sudu rancangan.

Pada kecepatan angin dan RPM yang sama, semakin besar *chord* nya maka pembebanannya akan semakin besar. Gaya atau beban yang lebih besar akan menghasilkan *slip stream*, a yang lebih besar. Dengan sudut puntir, β yang sama, kenaikan *slip stream* akan mengurangi sudut serang aliran, α .

Pada sudut serang, α yang kecil, aerofoil *LS (1) – 0417 Mod* yang digunakan sebagai penampang sudu mempunyai c_l/c_d yang lebih kecil. Prestasi sudu sangat dipengaruhi oleh prestasi aerofoil sebagai penampangnya. Berdasarkan persamaan (2), (3), dan (4), secara implisit penurunan harga c_l/c_d akan mengurangi gaya putar sudu, dF . Berdasarkan persamaan (5), (6), dan (7), maka dengan diameter rotor dan kecepatan putar rotor (RPM) yang sama, penurunan gaya putar, dF akan mengurangi daya keluaran sudu.

Note: Notasi c_l/c_d pada aerofoil dituliskan dengan huruf besar C_l/C_d untuk rotor.

4.3 Analisis Sudu *Untwist Rectangular*

Sudu *untwist rectangular* merupakan sudu dengan dua modifikasi, yaitu *untwist* dan *rectangular* atau tanpa puntiran dan *chord* konstan. Secara umum dua kali modifikasi atau

penyederhanaan akan menghasilkan prestasi yang tidak lebih baik dari satu kali modifikasi. Namun yang terjadi adalah sudu *untwist rectangular* mempunyai prestasi yang sedikit lebih baik dari sudu *untwist* maupun sudu *rectangular*.

Perbandingan antara sudu *rectangular* dan sudu *untwist rectangular* dapat digunakan sebagai bahan analisis. Yang menjadi pertanyaan selanjutnya adalah: "Mengapa dengan geometri *rectangular*, bentuk *untwist* lebih baik daripada bentuk *twist*?"

Sudu *untwist rectangular* mempunyai sudut puntir, β yang lebih besar daripada sudu *rectangular* pada daerah ujung sudu. Dengan *chord* yang sama, pembebanan di daerah ujung sudu tidak jauh berbeda sehingga perbedaan *slip stream* yang dihasilkan juga tidak signifikan. Harga *slip stream* sangat mempengaruhi sudut serang, α . Dengan sudut serang yang hampir sama, sudut puntir yang lebih besar akan menghasilkan sudut aliran, ϕ yang lebih besar karena sudut aliran merupakan penjumlahan dari sudut serang dan sudut puntir (lihat kembali **Gambar 2** atau **Gambar 3**).

Pada rotor, bila harga C_l dan C_d hampir sama, maka semakin besar sudut aliran akan menghasilkan gaya putar yang semakin besar pula. Hal ini sesuai pengertian dalam persamaan (2). Dengan diameter rotor dan kecepatan putar rotor yang sama, semakin besar gaya putar sudu maka daya yang dihasilkan juga akan semakin besar. (Note: pada aerofoil c_l dan c_d dituliskan dengan huruf kecil, sedang pada rotor ditulis dengan huruf besar).

4.4 Analisis Kemampuan Start-Up

Kemampuan *start-up* sudu *untwist* lebih kecil dibandingkan sudu rancangan. Pada daerah di atas 70% radius sudu, sudu *untwist* mempunyai sudut puntir, β yang lebih besar sehingga menghasilkan kemampuan *start-up* yang lebih baik.

Namun pada daerah di bawah 70% radius sudu yang terjadi adalah sebaliknya sehingga secara kumulatif kemampuan *start-up* menjadi lebih kecil.

Kemampuan *start-up* sudu *rectangular* tidak jauh berbeda dengan sudu rancangan. Dengan puntiran yang sama, pemilihan *chord* rata-rata akan menghasilkan kemampuan *start-up* yang hampir sama.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Beberapa kesimpulan dan saran yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah

1. Penggunaan Metode Elemen Sudu-Momentum sangat efektif untuk perancangan dan analisis sudu beserta modifikasinya.
2. Pada sudu 50 kW, penyederhanaan geometri berupa:
 - pengabaian puntiran (*untwist*),
 - distribusi *chord* yang konstan (*rectangular*),
 - maupun keduanya (*untwist-rectangular*)

akan mengakibatkan penurunan daya masing-masing sebesar 6,8 %, 6,5% dan 5,1 %

3. Sudu *untwist* dengan sudut puntir diambil dari 70% radius sudu rancangan mempunyai kemampuan *start-up* yang lebih kecil. Sudu *rectangular* dengan *chord* diambil dari *chord* rata-rata sudu rancangan mempunyai kemampuan *start-up* yang hampir sama.
4. Dengan hasil penurunan daya tersebut pada no. 2, modifikasi sudu dapat dilakukan sepanjang kemampuan produksi tidak menunjang untuk pembuatan sudu yang ideal (optimum), karena penurunan daya tidak terlalu berpengaruh sepanjang energi angin dapat diperoleh secara cuma-cuma.
5. Untuk memperoleh hasil yang lebih akurat perlu dilakukan perhitungan ulang sudu *untwist* dengan sudut puntir diambil dari 100% radius sudu, 50% radius sudu, dan 30% radius sudu.
Juga menghitung ulang untuk sudu *rectangular* dengan *chord* diambil dari *chord* di ujung dan di pangkal sudu rancangan.
6. Perhitungan ulang lainnya adalah dengan perhitungan sudu *untwist rectangular* dengan menggabungkan pertimbangan terurai pada no. 5.

REFERENSI

1. Abbot, Ira H and Albert E. Von Doenhoff (1959), *Theory of Wing Section*, Dover Publications Inc., New York, 1959
2. Anderson, J.D., Jr (1985), *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc. Graw Hill company, Singapore.
3. De Renzo, D.J. (1979), *Wind Power (Recent Development)*, Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, U.S.A.
4. Glauert, H. (1935), *Airplane Propellers. Div. Vol IV of Durand's "Aerodynamics Theory"*, Dover Publications, New York
5. Gostelow (1984), *Cascade Aerodynamics*, Pergamon Press, Sidney.
6. Larrabee, E.E.(1979), *Design of Propellers for Motorsoares*, NASA CP-2085, Part I
7. Mc. Cormick, Barnes W. (1995), *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Performance*, John Wiley & Sons, Canada.
8. Burton T., et al. (2001), *Wind Energy Hand Book*, John Wiley & Sons.