

ANALISIS DAN OPTIMASI SUDU SKEA 5 KW UNTUK PEMOMPAAN

Sulistyo Atmadi, Ahmad Jamaludin Fitroh
Peneliti Aerodinamika, LAPAN
e-mail: sulistyoa@aerospaceitb.org

ABSTRACT

LAPAN Wind Energy Conversion System (WECS) for pumping (SKEA-MARUTO) has a rotor diameter of 4.5 m and 6 number of blades. The blade used is a curved plate area. The result of recalculation has shown that operational condition on 10 m/sec wind speed and 100 rpm rotational speed, the rotor produces 4.74 kW. By assuming of 20% generator losses, the SKEA will produces power of 3.79 kW. To improve this performance to 5 kW, the rotor diameter has to be increased to 6 m. Chord and twist distribution are made similar to the previous design, and remain unchanged. Calculation is made by varying number of blades and blade rotation. At the wind speed of 10 m/sec and the rotational speed of 100 rpm, the SKEA able to produce the power of 6.36 kW.

Key words: *WECS, 5 kW, curved plate*

ABSTRAK

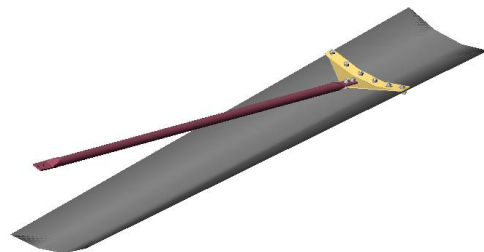
Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) LAPAN untuk pemompaan (SKEA-MARUTO) memiliki diameter rotor 4,5 m dengan jumlah sudu sebanyak 6 buah. Penampang sudu yang digunakan berupa pelat lengkung. Hasil perhitungan ulang menunjukkan bahwa pada kondisi operasional dengan kecepatan angin 10 m/det. dan putaran 100 rpm, daya yang dihasilkan rotor sebesar 4,74 kW. Dengan mengasumsikan bahwa *losses* generator sebesar 20%, maka SKEA Pemompaan tersebut hanya menghasilkan daya sebesar 3,79 kW. Untuk meningkatkan daya keluaran rotor maupun SKEA agar mencapai 5 kW, maka diameter rotor diperbesar menjadi 6 m. Distribusi *chord* dan puntiran dibuat sama dengan rotor sebelumnya. Perhitungan dilakukan dengan memvariasikan jumlah sudu dan putaran. Pada kecepatan angin 10 m/det, putaran 100 rpm, SKEA hasil optimasi mampu menghasilkan daya generator 6,39 kW.

Kata kunci: *SKEA, 5 kW, pelat lengkung*

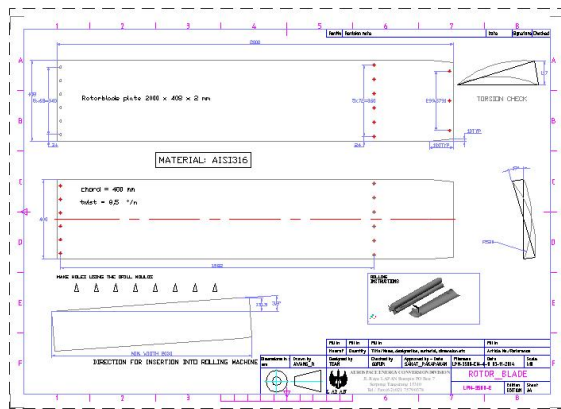
1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) LAPAN untuk pemompaan SKEA-MARUTO memiliki diameter rotor 4,5 m dengan jumlah sudu sebanyak 6 buah. Penampang sudu yang digunakan berupa pelat lengkung.



Gambar 1-1: Sudu pelat lengkung



Gambar 1-2: Geometri sudu pelat lengkung

Hasil perhitungan ulang menunjukkan bahwa pada kondisi operasional dengan kecepatan angin 10 m/det. dan putaran 150 rpm, daya yang dihasilkan rotor sebesar 3,06 kW. Dengan mengasumsikan bahwa *losses* generator sebesar 20%, maka SKEA Pemompaan tersebut hanya menghasilkan daya sebesar 2,45 kW. Untuk meningkatkan daya keluaran, maka perlu dilakukan modifikasi. Dalam penelitian ini modifikasi yang dilakukan adalah memperbesar diameter rotor.

1.2 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah menghitung ulang prestasi SKEA Pemompaan MARUTO yang sudah dimiliki LAPAN, dan kemudian melakukan analisis hasil penghitungan ulang dan mengoptimasi rotor untuk meningkatkan daya keluaran.

1.3 Batasan Masalah

Karakteristik aerodinamika pelat lengkung sebagai penampang sudu diperoleh dari simulasi menggunakan salah satu piranti lunak berbasis *CFD*. Torsi sudu diperoleh dari perhitungan menggunakan Metode Vortex. Metode tersebut merupakan perpaduan antara Metode Momentum dan Metode Elemen Sudu. Daya rotor diperoleh dari perkalian antara torsi sudu dan putaran rotor. Perhitungan dilakukan pada standar permukaan laut. Perhitungan dilakukan

dengan memvariasikan jumlah sudu dan putaran. Jumlah sudu divariasikan sebanyak 3, 4, 6, dan 8 buah. Putaran rotor dihitung mulai dari 10 rpm sampai dengan putaran yang bervariasi sesuai dengan putaran maksimum pada saat rotor sudah tidak menghasilkan daya lagi. Kecepatan angin yang digunakan dalam perhitungan adalah sebesar 10 m/det.

Optimasi rotor dilakukan dengan memperbesar diameter rotor. Distribusi chord dan puntiran dibuat sama dengan sudu semula. Optimasi juga dilakukan dengan memvariasikan jumlah sudu dan putaran yang sama dengan analisis awal.

2 METODE

2.1 Simulasi Pelat Lengkung

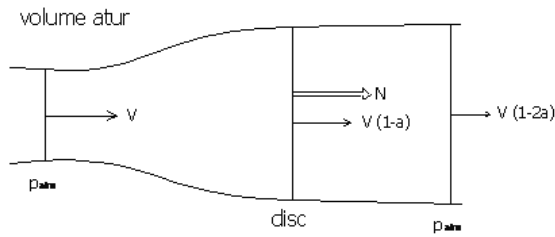
Karakteristik aerodinamika pelat lengkung sebagai penampang sudu diperoleh dari simulasi menggunakan salah satu piranti lunak berbasis *CFD*. Simulasi dilakukan pada kondisi *steady*. Metode turbulensi yang digunakan adalah *k-epsilon standard*. Kerapatan udara lokal disesuaikan dengan persamaan gas ideal. Viskositas aliran dibuat konstan sama dengan standar permukaan laut (Manual *FLUENT*).

2.2 Metode Analisis Sudu (Glauert, H., 1935; Larrabee, E. E, 1979)

Analisis sudu atau rotor dapat dilakukan menggunakan tiga metode, yaitu Metode Momentum, Metode Elemen Sudu, dan Metode Vortex. Metode yang terakhir tersebut merupakan perpaduan antara kedua metode sebelumnya. Metode Vortex juga dikenal sebagai *Blade Elemen Momentum (BEM) Theory*.

2.2.1 Metode momentum

Metode ini menerapkan hukum kekekalan massa dan momentum. Volume atur dan sketsa kecepatan pada metode ini disajikan sebagai berikut:

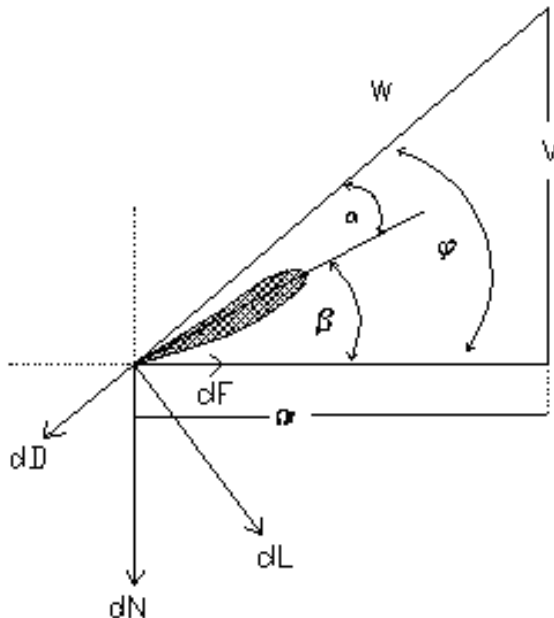


Gambar 2-1: Sketsa volume atur pada Metode Momentum

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 a disebut sebagai *slip stream*. Metode ini mengasumsikan bahwa kecepatan angin tepat di depan dan di belakang sudu adalah sama, yaitu $V(1-a)$.

2.2.2 Metode elemen sudu

Metode Elemen Sudu mempunyai prinsip yang sama dengan analisis sebuah aerofoil, yaitu menggambarkan diagram kecepatan dan gaya seperti pada sketsa berikut:



Gambar 2-2: 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 ke elemen sudu (m)

α = sudut serang (derajat)

β = sudut pasang/sudut puntir (derajat)

ϕ = sudut aliran (derajat)

Komponen/proyeksi gaya angkat, dL dan gaya hambat, dD dalam arah tangensial akan menghasilkan gaya putar, dF sebagai berikut:

$$dF = dL \sin \phi - dD \cos \phi \quad (2-1)$$

dengan

$$dL = \frac{1}{2} \rho w^2 c C_l \quad (2-2)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho w^2 c C_d \quad (2-3)$$

c = chord (m)

C_l = koefisien gaya angkat

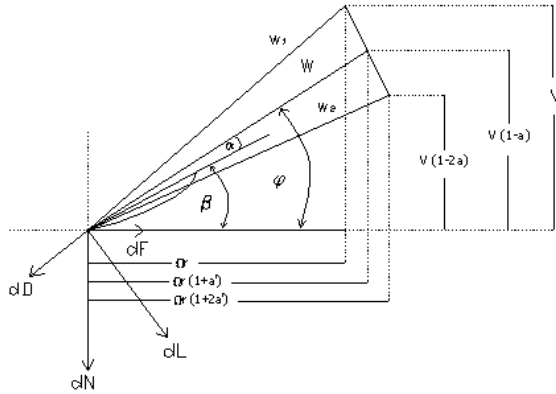
C_d = koefisien gaya hambat

ρ = kerapatan udara

Metode ini tidak memperhitungkan pengurangan kecepatan angin setelah melewati sudu.

2.2.3 Metode elemen sudu-momentum (Vortex)

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 ke dalam persamaan sehingga menghasilkan diagram gaya dan kecepatan sebagai berikut:



Gambar 2-3: Sketsa arah gaya dan kecepatan pada Metode Elemen Sudu-Momentum

Untuk mendapatkan harga dF , persamaan (2-1) masih dapat digunakan. Perkalian antara r dan dF menghasilkan torsi,

$$dQ = rdF \tag{2-4}$$

Akumulasi torsi dari setiap elemen sudu menghasilkan torsi total sudu,

$$Q = B \int dQ \tag{2-5}$$

dengan B = jumlah sudu

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

$$P = \Omega Q \tag{2-7}$$

Koefisien daya rotor, c_p dihitung sebagai berikut (David M Eggleston & Forrest S Stoddard, 1987; Erich Hau, 2006; Tony Burton, et al., 2001):

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

dengan

- P = daya (Watt)
- ρ = kerapatan udara (kg/m³)
- D_R = diameter rotor (m)
- V = kecepatan angin (m/det)

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

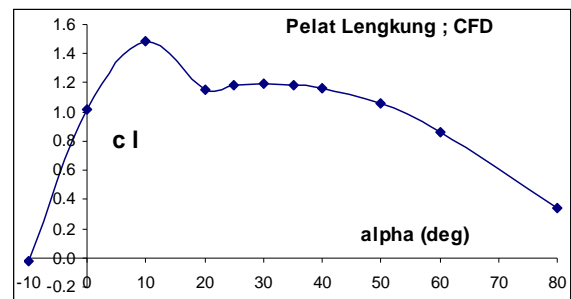
3.1 Karakteristik Aerodinamika Pelat Lengkung

Hubungan antara sudut serang, koefisien gaya angkat, dan koefisien gaya hambat pada pelat lengkung sebagai

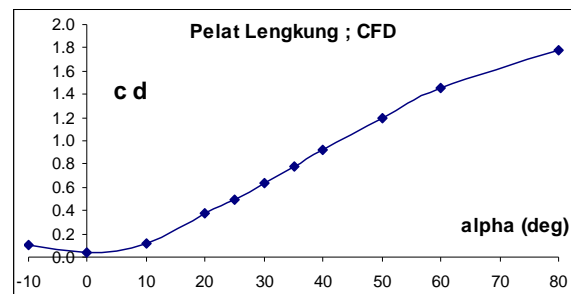
penampang sudu SKEA Pemompaan ini diperoleh dari geometri pelat lengkung yang disimulasi menggunakan salah satu piranti lunak berbasis CFD. Hasilnya disajikan dalam Tabel 3-1 dan Gambar 3-1.

Tabel 3-1: KARAKTERISTIK PELAT LENGKUNG

α (derajat)	C_l	C_d	C_l/C_d
-10	-0,023	0,107	0
0	1,020	0,039	26
10	1,490	0,118	13
20	1,155	0,381	3
25	1,179	0,500	2
30	1,193	0,634	2
35	1,189	0,775	2
40	1,165	0,916	1
50	1,057	1,190	1
60	0,860	1,450	1
80	0,340	1,775	0



Gambar 3-1a: Karakteristik pelat lengkung; [$\alpha - c_l$]



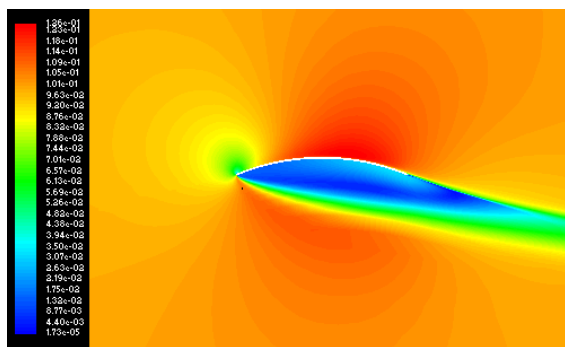
Gambar 3-1b: Karakteristik pelat lengkung; [$\alpha - c_d$]

Gambar 3-1a menunjukkan hubungan antara α dan c_l . Pada α sama dengan nol, pelat lengkung sudah memberikan gaya angkat. Hal tersebut

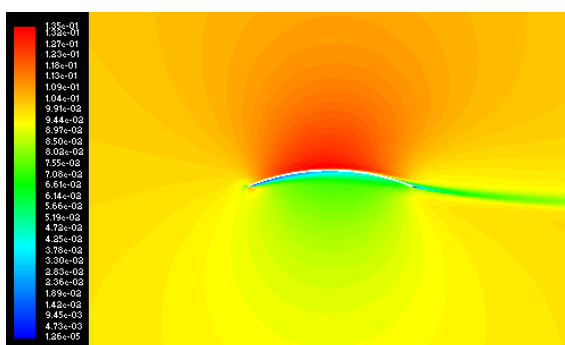
dikarenakan adanya kelengkungan (*chamber*) (Anderson, John D., 1985; Gostelow, 1984). Pada α sama dengan 20 derajat, terjadi perubahan kurva. Hal tersebut dikarenakan pada posisi tepat horisontal, *leading edge* pelat membentuk sudut sebesar 20 derajat terhadap horisontal. Harga c_l maksimum sebesar 1,49 terjadi pada α sama dengan 10 derajat. Harga c_l mendekati 0 pada α sekitar -10 derajat.

Gambar 3-1b menunjukkan hubungan antara α dan c_d . Harga c_d minimum terjadi pada α sekitar 0 derajat. Penambahan sudut serang memberikan kenaikan harga c_d . Hal tersebut dikarenakan separasi aliran yang semakin besar.

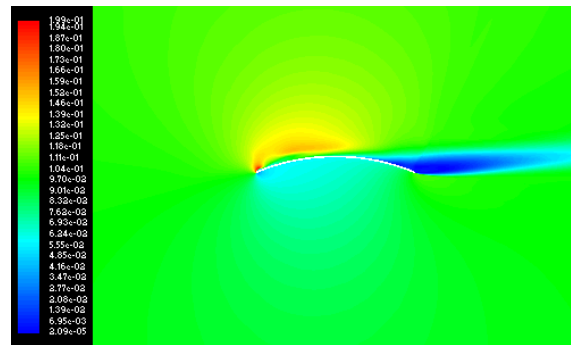
Selain disajikan dalam bentuk hubungan antara α , c_l , dan c_d , hasil simulasi dapat juga disajikan dalam bentuk kontur distribusi kecepatan. Gambar 3-2 menyajikan distribusi kecepatan pada α sama dengan -10, 0, 10, dan 80 derajat.



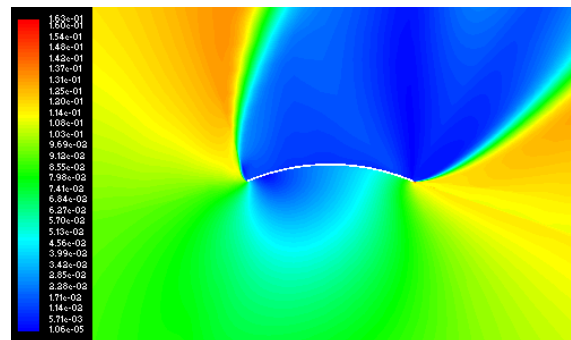
Gambar 3-2a: Distribusi kecepatan (Mach) pada $\alpha = -10$ derajat



Gambar 3-2b: Distribusi kecepatan Mach pada $\alpha = 0$ derajat



Gambar 3-2c: Distribusi kecepatan Mach pada $\alpha = 10$ derajat



Gambar 3-2d: Distribusi kecepatan Mach pada $\alpha = 80$ derajat

Pada $\alpha = -10$ derajat, terjadi separasi aliran yang sangat besar pada permukaan bawah pelat lengkung sehingga hampir tidak terjadi gaya angkat. Pada $\alpha = 0$ derajat, aliran masih cenderung mengikuti permukaan pelat sehingga kecepatan aliran pada permukaan atas lebih tinggi. Kecepatan yang lebih tinggi memberikan tekanan statik yang lebih kecil sehingga terjadi gaya angkat. Pada α yang lebih besar yaitu 10 derajat, jarak tempuh aliran pada permukaan atas menjadi semakin besar sehingga kecepatannya juga menjadi lebih tinggi. Pada akhirnya tekanan statik pada permukaan atas menjadi jauh lebih kecil sehingga gaya angkat yang dihasilkan menjadi lebih besar. Pada α yang jauh lebih besar yaitu 80 derajat, terjadi separasi aliran yang sangat besar sehingga gaya angkatnya menjadi turun secara signifikan (Abbort, Ira H, Von Doenhoff, Albert E., 1959; Anderson, John D., 1985).

3.2 Performa Sudu Semula

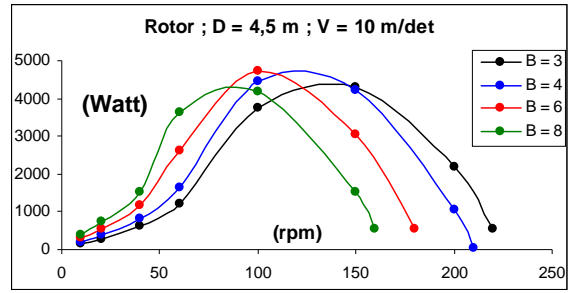
Rotor semula mempunyai geometri sebagai berikut:

- Penampang sudu = pelat lengkung
- Diameter rotor = 4,5 m
- Diameter pangkal = 0,5 m
- Chord = 40 cm
- Puntiran = 17 derajat
- Sudut sudu di pangkal = 31,5 derajat

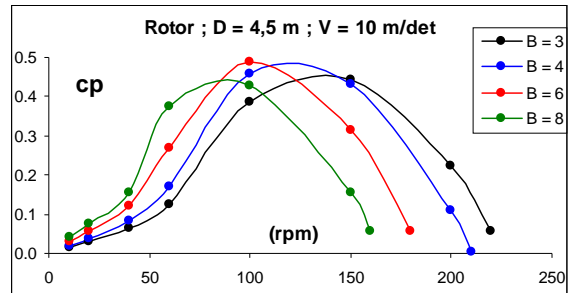
Hasil perhitungan rotor semula disajikan dalam Tabel 3-2 dan Gambar 3-3.

Tabel 3-2: PRESTASI ROTOR SEMULA

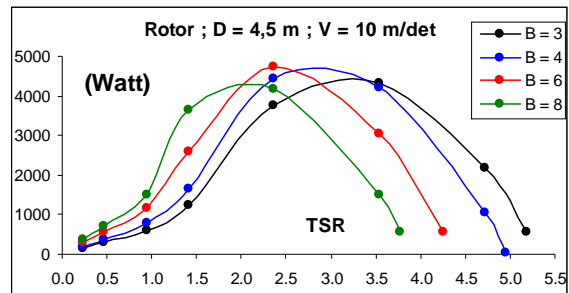
Jumlah Sudu, B	Tip Speed Ratio T SR	Putaran rotor (rpm)	Daya rotor (Watt)	Koef Tekanan cp	Daya Generator (Watt)
3	0,236	10	152	0,016	122
	0,472	20	292	0,030	234
	0,944	40	614	0,063	491
	1,416	60	1225	0,126	980
	2,360	100	3768	0,387	3014
	3,540	150	4315	0,443	3452
	4,720	200	2177	0,224	1742
	5,192	220	551	0,057	441
4	0,236	10	202	0,021	161
	0,472	20	385	0,040	308
	0,944	40	807	0,083	645
	1,416	60	1650	0,169	1320
	2,360	100	4447	0,457	3557
	3,540	150	4219	0,433	3375
	4,720	200	1053	0,108	843
	4,956	210	42	0,004	34
6	0,236	10	297	0,031	238
	0,472	20	562	0,058	450
	0,944	40	1173	0,121	939
	1,416	60	2613	0,268	2090
	2,360	100	4745	0,487	3796
	3,540	150	3060	0,314	2448
	4,248	180	549	0,056	439
	8	0,236	10	390	0,040
0,472		20	729	0,075	583
0,944		40	1514	0,156	1211
1,416		60	3645	0,374	2916
2,360		100	4167	0,428	3334
3,540		150	1507	0,155	1206
3,776		160	557	0,057	446



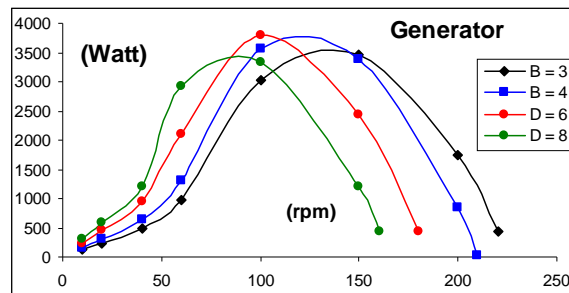
Gambar 3-3a: Kurva Kecepatan putaran terhadap Daya [rpm-Watt]



Gambar 3-3b: Kurva Kecepatan putaran terhadap Koefisien Tekanan [rpm - cp]



Gambar 3-3c: Kurva Kecepatan Ujung terhadap Daya Rotor [TSR-Watt]



Gambar 3-3d: Kurva daya SKEA; [rpm-Watt]

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa jumlah sudu sangat mempengaruhi karakteristik rotor. Semakin banyak jumlah sudu, maka daya optimumnya dicapai pada putaran yang lebih rendah. Misalnya rotor dengan jumlah sudu 3 buah akan menghasilkan

daya maksimum sebesar 4,3 kW pada putaran sekitar 150 rpm sedangkan jumlah sudu 8 buah akan menghasilkan daya maksimum sekitar 4,2 kW pada putaran yang lebih rendah yaitu kurang dari 100 rpm.

Variasi jumlah sudu menunjukkan bahwa daya rotor maksimum dicapai pada jumlah sudu sama dengan 6, yaitu sebesar 4,75 kW pada 100 rpm. Dengan adanya losses generator, maka daya yang dihasilkan SKEA menjadi 3,8 kW.

Apabila rotor semula dipasang pada generator putaran rendah, maka sebaiknya menggunakan jumlah sudu yang lebih banyak karena akan menghasilkan daya yang lebih besar. Misalnya pada putaran 40 rpm, pada putaran tersebut, rotor bersudu 3, 4, 6, dan 8 buah masing-masing akan menghasilkan daya sebesar 614, 807, 1.173, dan 1.514 Watt. Demikian juga sebaliknya, misalnya analisis pada putaran 150 rpm. Pada putaran tersebut, rotor bersudu 3, 4, 6, dan 8 buah masing-masing akan menghasilkan daya sebesar 4.315, 4.219, 3.060, dan 1.507 Watt.

Pada paragraf sebelumnya telah disebutkan bahwa daya rotor maksimum dicapai pada jumlah sudu sama dengan 6, yaitu sebesar 4,75 kW pada 100 rpm. Merujuk pada persamaan (2-8), maka daya tersebut bersesuaian dengan harga c_p sebesar 0,487 seperti pada Tabel 3-2. Dengan diameter rotor sebesar 4,5 m maka pada kecepatan angin 10 m/det, putaran 100 rpm tersebut bersesuaian dengan *Tip Speed Ratio (TSR)* sama dengan 2,36. Hasil tersebut memberi kesimpulan bahwa rotor dengan sudu bergeometri pelat lengkung dengan sudut sudu yang cukup besar akan menghasilkan daya yang optimal jika bersudu banyak dan dioperasikan pada *TSR* rendah.

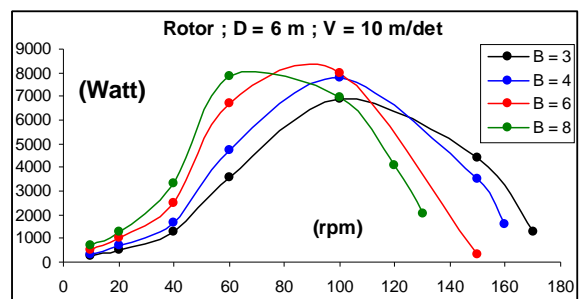
3.3 Optimasi Rotor

Untuk meningkatkan daya keluaran rotor, maka diameter rotor ditambah dari 4,5 m menjadi 6 m. Selain itu diameter pangkal juga dinaikkan dari 0,5 m menjadi 1 m. Parameter lainnya

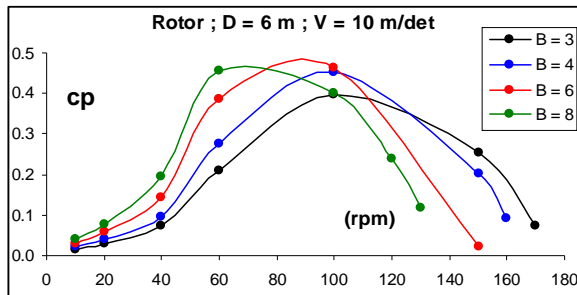
dibuat sama dengan rotor sebelumnya. Prestasi rotor hasil perhitungan disajikan dalam Tabel 3-3 dan Gambar 3-4.

Tabel 3-3: PRESTASI ROTOR OPTIMASI

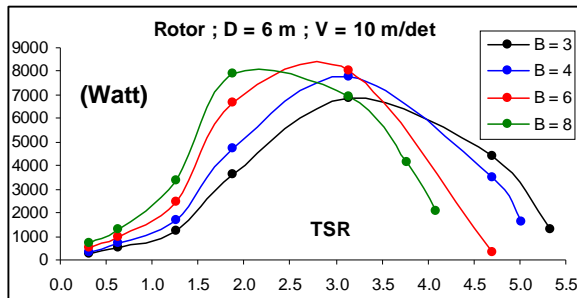
Jumlah Sudu, B	Tip Speed Ratio TSR	Putaran rotor (rpm)	Daya rotor (Watt)	Koef Tekanan cp	Daya Generator (Watt)
3	0,314	10	265	0,015	212
	0,628	20	517	0,030	414
	1,256	40	1260	0,073	1008
	1,884	60	3596	0,208	2877
	3,140	100	6887	0,398	5510
	4,710	150	4376	0,253	3501
	5,338	170	1270	0,073	1016
4	0,314	10	351	0,020	281
	0,628	20	683	0,039	546
	1,256	40	1668	0,096	1334
	1,884	60	4747	0,274	3798
	3,140	100	7798	0,451	6239
	4,710	150	3492	0,202	2794
	5,024	160	1597	0,092	1278
6	0,314	10	518	0,030	415
	0,628	20	1002	0,058	802
	1,256	40	2466	0,142	1973
	1,884	60	6700	0,387	5360
	3,140	100	7998	0,462	6399
	4,710	150	350	0,020	280
8	0,314	10	681	0,039	545
	0,628	20	1307	0,075	1045
	1,256	40	3350	0,194	2680
	1,884	60	7868	0,455	6295
	3,140	100	6941	0,401	5553
	3,768	120	4117	0,238	3293
	4,082	130	2055	0,119	1644



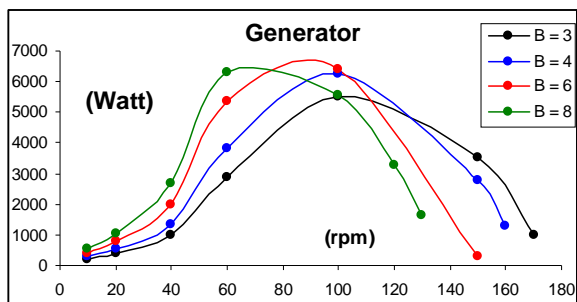
Gambar 3-4a: Kurva Kecepatan Putar terhadap Daya Rotor [rpm-Watt]



Gambar 3-4b: Kurva Kecepatan putar terhadap Koefisien tekanan [rpm - c_p]



Gambar 3-4c: Kurva Kecepatan ujung terhadap Daya [TSR-Watt]



Gambar 3-4d: Kurva Kecepatan putar terhadap daya generator [rpm-Watt]

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penambahan diameter rotor menghasilkan kenaikan daya yang dihasilkan. Untuk rotor bersudu 3 buah, daya keluaran generator maksimum sebesar 5,5 kW dicapai pada putaran sekitar 100 rpm. Untuk jumlah sudu sama dengan 4 buah, daya keluaran generator sebesar 6,2 kW dicapai pada putaran yang tidak jauh berbeda yaitu sekitar 100 rpm. Penambahan jumlah sudu menghasilkan putaran operasional yang lebih rendah. Untuk rotor bersudu 6 buah, daya keluaran generator maksimum sekitar 6,5 kW dicapai pada putaran sekitar 90 rpm. Untuk jumlah sudu sama dengan 8 buah, daya keluaran

generator maksimum sekitar 6,3 kW dicapai pada putaran sekitar 60 rpm.

4 KESIMPULAN

- Hasil perhitungan ulang terhadap SKEA Pemompaan dengan 6 buah sudu pada kecepatan angin 10 m/det dan putaran 100 rpm menghasilkan daya keluaran generator hanya sebesar 3,79 kW.
- Penambahan diameter rotor dari 4,5 menjadi 6 m dengan jumlah sudu dan kondisi kecepatan angin dan putaran yang sama menghasilkan daya keluaran generator lebih dari 5 kW, hingga mencapai 6,39 kW.
- Rotor dengan jumlah sudu 6 merupakan rotor dengan daya yang paling optimal dibandingkan dengan jumlah sudu yang lain untuk putaran rendah, 100 rpm.

DAFTAR RUJUKAN

Abbort, Ira H, Von Doenhoff, Albert E., 1959. *Theory of Wing Section*, Dover Publications Inc., New York.

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

David M Eggleston & Forrest S Stoddard, *Wind Turbine Engineering Design*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1987.

Erich Hau, *Wind Turbine Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Springer, Berlin, 2006.

Glauert, H., 1935. *Airplane Propellers, Div. Vol IV of Durand's "Aerodynamics Theory"*, Dover Publications, New York.

Gostelow, 1984. *Cascade Aerodynamics*, Pergamon Press, Sidney.

Larrabee, E. E., *Design of Propellers for Motorsoares*, NASA CP-2085, Part I, 1979.

Manual FLUENT.

Tony Burton, et. al. 2001. *Wind Energy Hand Book*, John Willey & Sons.

