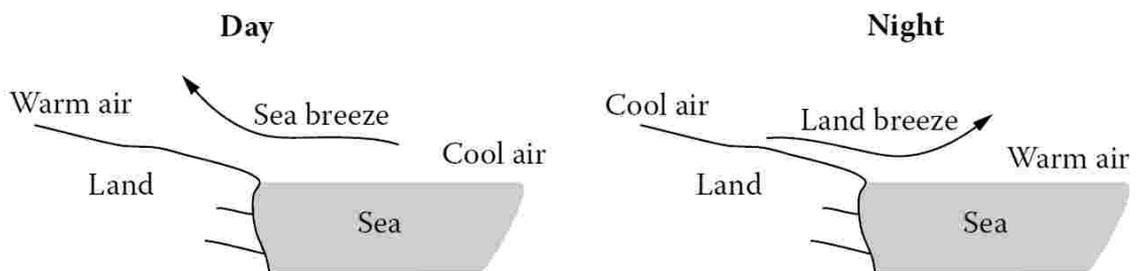


BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Definisi Energi Angin

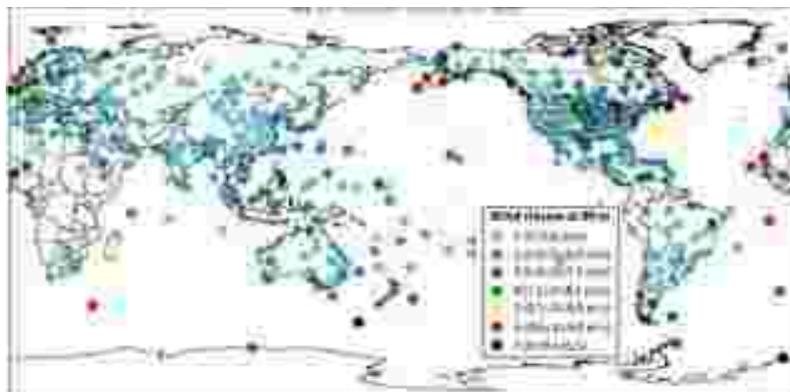
Angin adalah udara yang bergerak yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara disekitarnya. Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke bertekanan udara rendah. Pemanasan oleh matahari, maka udara memuai. Tekanan udara yang telah memuai massa jenisnya menjadi lebih ringan sehingga naik. Apabila hal ini terjadi, tekanan udara turun. Udara disekitarnya mengalir ke tempat yang bertekanan rendah. Udara menyusut menjadi lebih berat dan turun ke tanah. Diatas tanah udara menjadi panas lagi dan naik kembali. Aliran naiknya udara panas dan turunnya udara dingin ini dikarenakan konveksi [2].



Gambar 2.1 Sirkulasi udara di pantai [4].

Tenaga angin menunjuk kepada pengumpulan energi yang berguna dari angin. Pada tahun 2005, kapasitas energi generator tenaga angin adalah 58.982 MW, hasil tersebut kurang dari 1% pengguna listrik dunia. Meskipun masih berupa sumber energi listrik minor dikebanyakan Negara, Penghasil tenaga angin lebih dari empat kali lipat antara 1999 dan 2005 [2].

Kebanyakan tenaga angin modern dihasilkan dalam bentuk listrik dengan mengubah rotasi dari pisau turbin menjadi arus listrik dengan menggunakan generator listrik. Pada kincir angin energi angin digunakan untuk memutar peralatan mekanik untuk melakukan kerja fisik, seperti menggiling atau memompa air. Tenaga angin banyak jumlahnya, tidak habis-habis, tersebar luas dan bersih [2].



Gambar 2.2 Peta energi angin di Dunia [21]

2.1.1 Asal Energi Angin

Semua energi yang dapat diperbaharui dan bahkan energi pada bahan bakar fosil, kecuali energi pasang surut dan panas bumi berasal dari matahari. Matahari meradiasi $1,74 \times 10^{17}$ Kilowatt jam energi ke Bumi setiap jam. dengan kata lain, bumi ini menerima daya $1,74 \times 10^{17}$ watt. Sekitar 1-2% dari energi tersebut diubah menjadi energi angin. Jadi, energi angin berjumlah 50-100 kali lebih banyak daripada energi yang diubah menjadi biomassa oleh seluruh tumbuhan yang ada di muka bumi [2].

Sebagaimana diketahui, pada dasarnya angin terjadi karena ada perbedaan temperatur antara udara panas dan udara dingin. Daerah sekitar khatulistiwa, yaitu pada busur 0° , adalah daerah yang mengalami pemanasan lebih banyak dari matahari dibanding daerah lainnya di Bumi [2].

Daerah panas ditunjukkan dengan warna merah, oranye, dan kuning pada gambar 2.2. inframerah dari temperature permukaan laut yang diambil dari satelit NOAA-7 pada juli 1984. Udara panas lebih ringan daripada udara dingin dan akan naik ke atas sampai mencapai ketinggian sekitar 10 kilometer dan akan tersebar kearah utara dan selatan [2].

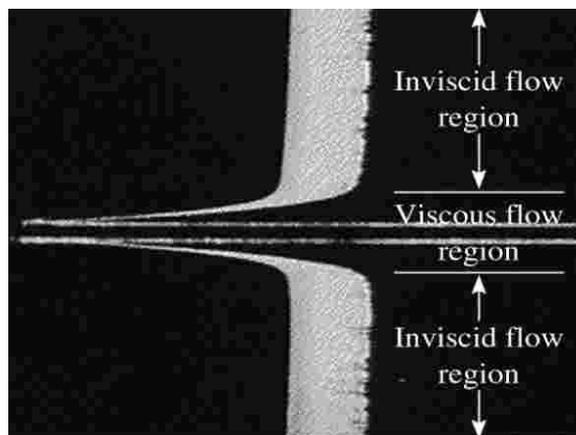
2.2 Klasifikasi Aliran Fluida

Sebelum mempelajari lebih jauh mengenai aliran fluida, perlu diketahui bahwa fluida disusun oleh molekul-molekul yang bertabrakan satu sama lain. Namun demikian, asumsi kontinum menganggap fluida bersifat kontinu. Dengan kata lain, properti seperti densitas, tekanan, temperatur, dan kecepatan dianggap terdefinisi pada titik-titik yang sangat kecil [3].

Gambar 2.3 Klasifikasi aliran fluida [4]

2.2.1 Aliran *Viscous* dan *Inviscid*

Perbedaan utama dari aliran *viscous* dan *inviscid* yaitu apabila pada aliran *inviscid* nilai dari koefisien viskositas diasumsikan nol ($\mu=0$) walaupun sebenarnya fluida dengan viskositas nol tidak pernah dijumpai. Sebaliknya aliran *viscous* adalah aliran fluida yang memiliki viskositas yang ditandai dengan munculnya efek gesekan yang signifikan. Aliran tersebut biasanya dekat dengan permukaan yang padat [4].



Gambar 2.4 Daerah aliran *inviscid* dan aliran *viscous* [5]

Gambar 2.4 menunjukkan daerah aliran *viscous* dan *inviscid* dimana daerah *inviscid* terlihat bahwa alirannya terpengaruh oleh gesekan yang terjadi dengan permukaan saluran yang berupa solid. Pengaruh dari viskositas yang terjadi antara fluida dengan permukaan solid dapat memperlambat kecepatan relatif dari keduanya. Permukaan solid mengalami gaya tarik yang berlawanan terhadap arah gerakan. Viskositas adalah kemampuan menahan suatu fluida terhadap deformasi, baik itu tegangan geser (*shear*) atau tegangan tarik (*tensile*) [5].

2.2.2 Aliran *Compressible* dan Aliran *Incompressible*

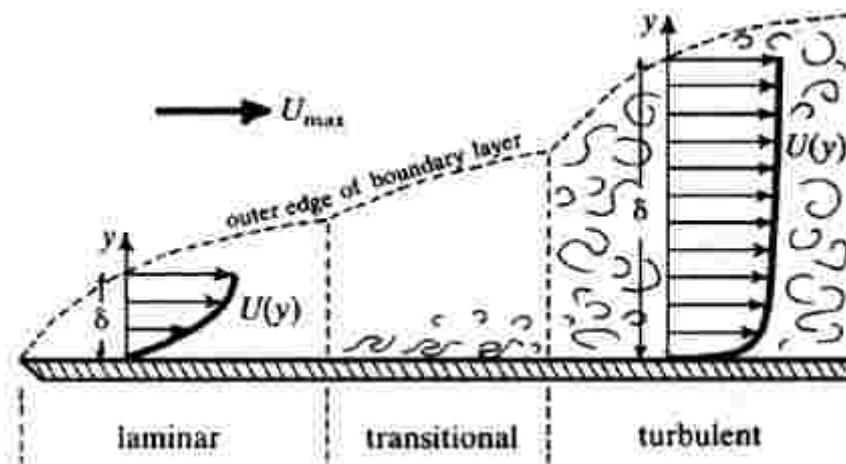
Aliran *compressible* atau mampu mampat yaitu aliran fluida yang dicirikan dengan berubahnya besaran kerapatan massa (densitas) dari fluida di sepanjang aliran tersebut. Contoh fluida termampatkan adalah: udara, gas alam, dll. Sedangkan aliran dikatakan *incompressible* atau tidak mampu mampat adalah aliran fluida yang dicirikan dengan tidak berubahnya besaran kerapatan massa (densitas) dari fluida di sepanjang aliran tersebut. Contoh fluida tak-termampatkan adalah: air, berbagai jenis minyak,

emulsi, dll. Indikator untuk menentukan pengaruh kompresibilitas suatu aliran dapat dilihat melalui *Mach Number* (Ma) yang didefinisikan sebagai rasio antara kecepatan aliran lokal terhadap kecepatan suara lokal [5]. Berikut ini merupakan indikator *mach number* antara lain:

- $Ma < 0.3$: *incompressible*
- $Ma < 1$: *Subsonic*
- $Ma = 1$: *Sonic*
- $Ma > 1$: *Supersonic*
- $Ma \gg 1$: *Hypersonic*

2.2.3 Aliran Laminar dan Turbulen

Aliran *viscous* dibedakan menjadi dua yaitu aliran laminar dan turbulen. Aliran laminar adalah aliran fluida yang bergerak dengan kondisi lapisan-lapisan yang membentuk garis-garis alir dan tidak berpotongan satu sama lain. Alirannya relatif mempunyai kecepatan rendah dan fluidanya bergerak sejajar & mempunyai batasan-batasan yang berisi aliran fluida. Partikel fluida mengalir atau bergerak dengan bentuk garis lurus dan sejajar. Laminar adalah ciri dari arus yang berkecepatan rendah, dan partikel sedimen dalam zona aliran berpindah dengan menggelinding (*rolling*) ataupun terangkat (*saltation*). Pada laju aliran rendah, aliran laminar tergambar sebagai filamen panjang yang mengalir sepanjang aliran. Aliran laminar mempunyai Bilangan Reynold lebih kecil dari 2300 [6].



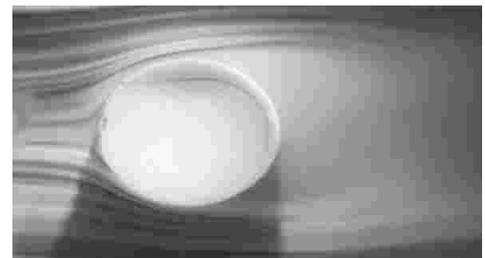
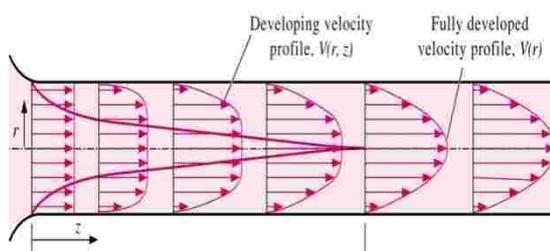
Gambar 2.5 Distribusi Kecepatan Aliran [6]

Aliran turbulen adalah aliran fluida yang partikel-partikelnya bergerak secara acak dan tidak stabil dengan kecepatan berfluktuasi yang saling interaksi. Akibat dari hal

tersebut garis alir antar partikel fluidanya saling berpotongan. Turbulen mentransport partikel-partikel dengan dua cara; dengan penambahan gaya fluida dan penurunan tekanan lokal ketika pusaran turbulen bekerja padanya. Keduanya adalah penyebab terjadinya transportasi pasir sepanjang bawah permukaan. Di alam hampir semua mekanisme transport pasir terjadi secara turbulen. Turbulen terutama terjadi di sungai akibat penggerusan sepanjang batas arus air, dan meningkat akibat kekasaran bawah permukaan; sepanjang garis pantai dan laut penyebabnya adalah ombak, tekanan angin permukaan, dan penggerusan arus. Di udara turbulen yang membawa bekas ledakan volkanis ditransport angin. Besarnya gerakan turbulen bervariasi dari mikro hingga makro, yang terakhir tadi sangat mudah dilihat di sungai dengan penampakan pusaran yang kompleks atau dengan boil yang berbenturan dengan permukaan sungai, secara terus menerus. Aliran turbulen mempunyai bilangan reynold yang lebih besar dari 4000 [6].

2.2.4 Aliran Internal dan Aliran Eksternal

Dalam ilmu mekanika fluida, yang dimaksud aliran internal adalah aliran dimana fluidanya dibatasi oleh suatu permukaan solid. Oleh karena itu lapisan batas tidak dapat berkembang karena dibatasi permukaan yang solid tersebut. Aliran internal didominasi oleh pengaruh viskositas pada sepanjang daerah kerjanya. Sedangkan pengertian aliran eksternal adalah aliran yang mengalir pada suatu benda yang terbenam dalam suatu fluida yang tak terbatas. Dengan kata lain, fluida yang mengalir berada diluar permukaan benda-benda tersebut. Efek *viscous* pada aliran eksternal terbatas pada lapisan batas dan *wake*.



(a)
b)

Gambar 2.6 (a) Fluida mengalir di dalam pipa, (b) Fluida mengalir yang menabrak suatu benda [5]

Gambar 2.6 menunjukkan contoh aliran internal dan aliran eksternal. Pada gambar (a) fluida yang mengalir melalui sebuah pipa merupakan contoh aliran internal karena fluida tersebut dibatasi oleh pipa. Sedangkan pada gambar (b) fluida yang mengalir menabrak suatu benda solid berbentuk lingkaran merupakan contoh dari aliran eksternal karena fluida berada diluar permukaan benda solid tersebut [5].

2.3 Persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli merupakan perkiraan hubungan antara tekanan, kecepatan dan perubahan ketinggian dan berlaku pada kondisi *steady* dan *incompressible* dimana mengabaikan gaya gesek *netto* [4]. Persamaan ini berguna pada daerah aliran diluar lapisan batas dan *wake*. Persamaan Bernoulli dapat dituliskan sebagai berikut:

(2.1)

Berikut ini merupakan batasan-batasan penggunaan persamaan Bernoulli:

- 1) Aliran *steady*, $d/t = 0$
- 2) Aliran Inkompresibel
- 3) Gesekan diabaikan, $\rho = \text{konstan}$
- 4) Aliran terjadi sepanjang garis lurus, kecuali untuk aliran irrotasional
- 5) Tidak ada perpindahan panas yang terjadi

2.4 Gerak Rotasi Benda Tegar

Gerak rotasi adalah gerakan melingkar dari sebuah objek terhadap pusat atau titik rotasi. Sebuah objek tiga dimensi yang selalu berputar di sekitar garis imajiner atau yang disebut sumbu rotasi. Jika sumbu berada didalam objek, dan melewati pusat massanya maka dapat dikatakan objek tersebut memutar dengan sendirinya atau *spin*. Suatu benda yang berotasi dan kemudian berotasi lagi terhadap suatu titik eksternal disebut revolusi, misalnya bumi yang mengelilingi matahari pada orbitnya.

2.5 Kecepatan Sudut

Kecepatan sudut menyatakan kecepatan suatu benda yang berputar atau frekuensi sudut suatu benda dan sumbu putarnya [6].

(2.3)

Dimana:

n = putaran turbin (rpm)

2.6 Daya Mekanik

Daya mekanik adalah daya yang dimiliki angin terhadap turbin yang dikenai aliran tersebut [7].

(2.4)

Dimana:

P_w : daya mekanik (W)

V : kecepatan angin (m/s)

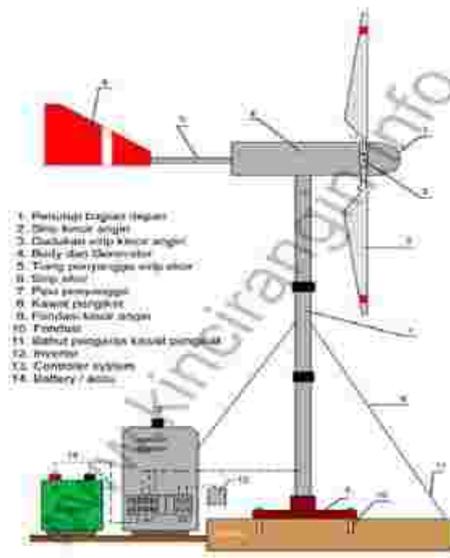
ρ : densitas udara (ρ rata-rata : $1,2 \text{ kg/m}^3$)

2.7 Klasifikasi Turbin Angin

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dll. Turbin angin terdahulu banyak digunakan di Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan *windmill* [3].

Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin. walaupun sampai saat ini penggunaan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional (Co: PLTD, PLTU, dll), turbin angin masih lebih dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam tak terbaharui (Co: batubara dan minyak bumi) sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik [3].

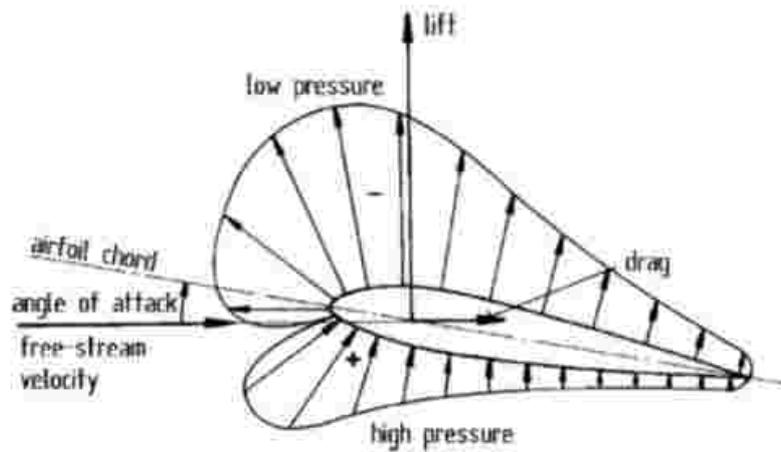
Angin adalah salah satu bentuk energi yang tersedia di alam, Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA) mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin. Cara kerjanya cukup sederhana, energi angin yang memutar turbin angin, diteruskan untuk memutar rotor pada generator dibelakang bagian turbin angin, sehingga akan menghasilkan energi listrik. Energi listrik ini biasanya akan disimpan kedalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan. Secara sederhana sketsa kincir angin adalah sebagai berikut [3]:



Gambar 2.7 Sketsa sederhana kincir angin [23]

2.7.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH)

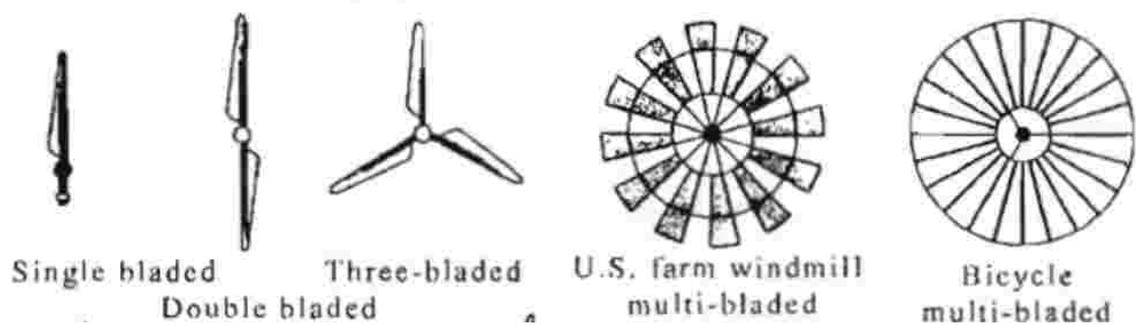
Turbin angin sumbu horizontal merupakan turbin angin yang sumbu rotasi rotornya paralel terhadap permukaan tanah. Turbin angin sumbu horizontal memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara dan diarahkan menuju dari arah datangnya angin untuk dapat memanfaatkan energi angin. Rotor turbin angin kecil diarahkan menuju dari arah datangnya angin dengan pengaturan baling – baling angin sederhana sedangkan turbin angin besar umumnya menggunakan sensor angin dan motor yang mengubah rotor turbin mengarah pada angin. Berdasarkan prinsip aerodinamis, rotor turbin angin sumbu horizontal mengalami gaya *lift* dan gaya *drag*, namun gaya *lift* jauh lebih besar dari gaya *drag* sehingga rotor turbin ini lebih dikenal dengan rotor turbin tipe *lift*, seperti terlihat pada gambar 2.9 [4].



Gambar 2.8 Gaya aerodinamik rotor turbin angin ketika dilalui aliran udara [4]

Dilihat dari jumlah sudu, turbin angin sumbu horizontal terbagi menjadi [4]:

1. Turbin angin satu sudu (*single blade*)
2. Turbin angin dua sudu (*double blade*)
3. Turbin angin tiga sudu (*three blade*)
4. Turbin angin banyak sudu (*multi blade*)



Gambar 2.9 Jenis turbin angin berdasarkan jumlah sudu [4]

2.7.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV)

Turbin angin sumbu vertikal merupakan turbin angin yang sumbu rotasi rotornya tegak lurus terhadap permukaan tanah. Jika dilihat dari efisiensi turbin, turbin angin sumbu horizontal lebih efektif dalam mengekstrak energi angin dibanding dengan turbin angin sumbu vertikal [3].

Meskipun demikian, turbin angin vertikal memiliki keunggulan, yaitu [3]:

Turbin angin sumbu vertikal tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah, tidak seperti turbin angin horizontal yang memerlukan mekanisme tambahan untuk menyesuaikan rotor turbin dengan arah angin.

Tidak membutuhkan struktur menara yang besar

Konstruksi turbin sederhana

Turbin angin sumbu vertikal dapat didirikan dekat dengan permukaan tanah, sehingga memungkinkan menempatkan komponen mekanik dan komponen elektronik yang mendukung beroperasinya turbin.

Jika dilihat dari prinsip aerodinamik rotor yang digunakan, turbin angin sumbu vertikal dibagi menjadi dua bagian yaitu [3]:

2.7.2.1 Turbin Angin Darrieus

Turbin angin Darrieus pada umumnya dikenal sebagai turbin *eggbeater*. Turbin angin Darrieus pertama kali ditemukan oleh Georges Darrieus pada tahun 1931. Turbin angin Darrieus merupakan turbin angin yang menggunakan prinsip aerodinamik dengan memanfaatkan gaya *lift* pada penampang sudu rotornya dalam mengekstrak energi angin.

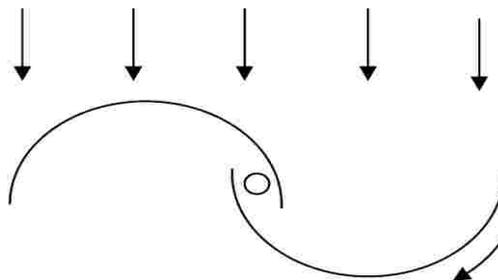
Turbin Darrieus memiliki torsi rotor yang rendah tetapi putarannya lebih tinggi dibanding dengan turbin angin Savonius sehingga lebih diutamakan untuk menghasilkan energi listrik. Namun turbin ini membutuhkan energi awal untuk mulai berputar. Rotor turbin angin Darrieus pada umumnya memiliki variasi sudu yaitu dua atau tiga sudu. Modifikasi rotor turbin angin Darrieus disebut dengan turbin angin H.



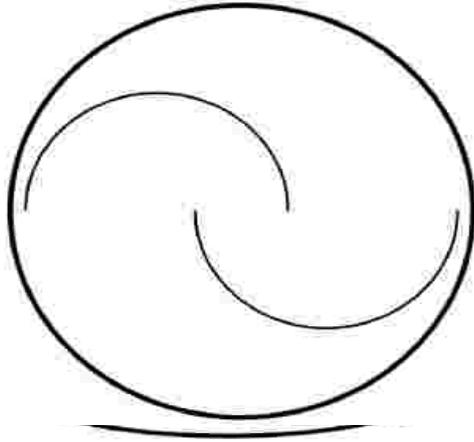
Gambar 2.10 Turbin Darrieus [3]

2.7.2.2 Turbin Angin Savonius

Rotor Savonius dikembangkan pertama kali oleh J. Savonius pada tahun 1920an. Konsep awal Savonius sendiri pertama kali dikembangkan oleh Flettner. Savonius banyak digunakan sebagai sebuah rotor, dimana bentuknya dibuat dari sebuah silinder yang dipotong pada sumbu bidang sentral menjadi dua bagian dan bagian tersebut disusun menyilang menyerupai huruf S [8].



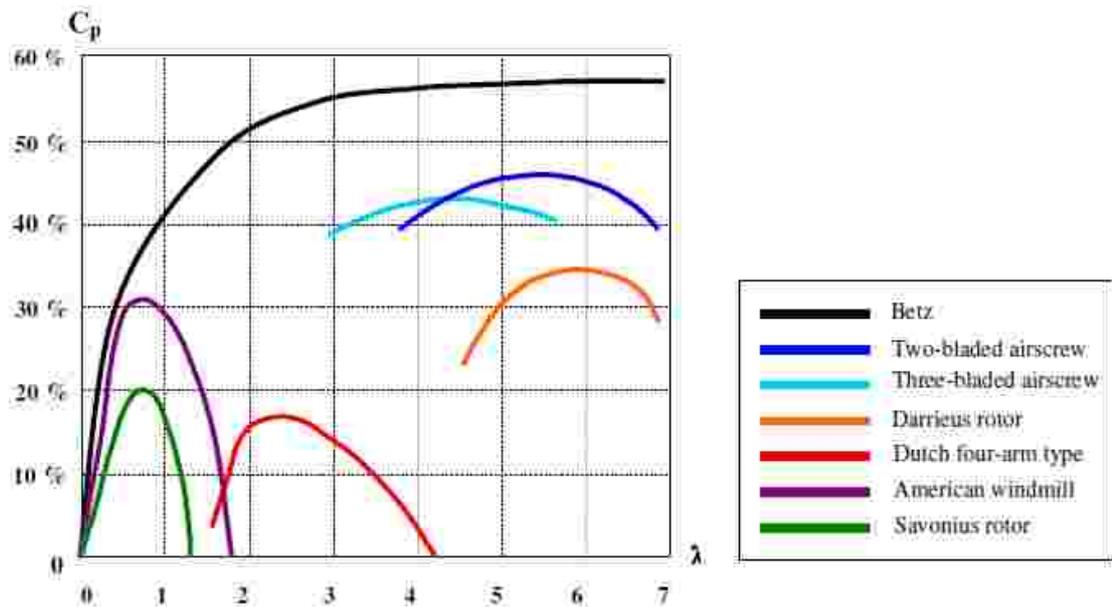
Gambar 2.11 Turbin Savonius Standar [10]



Gambar 2.12 Rotor Savonius dengan dua sudu [10]

Seperti tampak Gambar 2.12, Geometri dari rotor Savonius memungkinkan aliran fluida mengalir tegak lurus terhadap bidang sudu bagian cembung dan bagian cekung. Dimana koefisien drag untuk aliran tegak lurus dengan bidang cembung sebesar 1.2, sementara koefisien drag untuk sisi cekung hampir sebesar dua kalinya yaitu 2.1 [5]. Karena gaya drag yang dihasilkan pada bagian cekung lebih besar, hal ini akan mempengaruhi torsi putaran Savonius. Rotor yang bekerja dibawah pengaruh gaya drag umumnya mempunyai torsi awal yang besar tetapi memiliki efisiensi yang lebih kecil bila dibandingkan dengan rotor yang bekerja dengan gaya lift. Karena keuntungan inilah banyak orang memanfaatkan sebagai penggerak awal dari turbin poros vertikal tipe lift seperti yang dilakukan oleh R.gupta, R.Das dan K.K. Sharma dalam penelitiannya menggabungkan turbin Savonius-Darius [8].

Gambar 2.13 dibawah ini menyatakan grafik performa dari beberapa turbin angin konvensional yang paling banyak digunakan.



Gambar 2.13 Efisiensi kerja turbin angin konvensional pada umumnya [10]

Pada Gambar 2.13 menunjukkan kurva hubungan antara rasio perbandingan power turbin dengan power angin (C_p), sebagai fungsi dari speed ratio λ atau perbandingan kecepatan turbin angin dengan kecepatan angin. Kurva tersebut menunjukkan bahwa turbin angin sumbu horisontal (*two- or three- bladed airscrew*) memiliki efisiensi terbaik dibandingkan dengan turbin angin lainnya, di lain sisi turbin savonius sumbu vertikal memiliki efisiensi yang lebih rendah, yaitu pada nilai λ 1.0 dihasilkan C_p 0.2 [10].

2.8 Variasi Geometri Rotor Savonius

Geometri Turbin Savonius yang sering dijumpai mempunyai sepasang *bucket*, dimana disusun menyerupai huruf “S” dan bagian atas dengan bawahnya berbentuk plat lingkaran. Berikut ini merupakan beberapa variasi dari rotor Savonius yang pernah dibuat dan semuanya bekerja dengan baik.

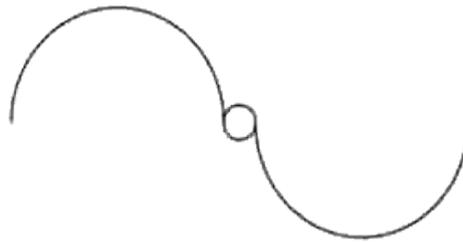
2.8.1 Rotor Savonius dengan Dua *Bucket*

Berdasarkan prinsip aerodinamis, rotor turbin ini memanfaatkan gaya hambat (*drag*) saat mengekstrak energi angin dari aliran angin yang melalui sudu turbin. Koefisien hambat permukaan cekung lebih besar dari pada permukaan cembung. Oleh sebab itu, sisi permukaan cekung setengah silinder yang dilalui angin akan memberikan

gaya hambat yang lebih besar daripada sisi lain sehingga rotor berputar. Setiap turbin angin yang memanfaatkan potensi angin dengan gaya hambat memiliki efisiensi yang terbatas karena kecepatan sudu tidak dapat melebihi kecepatan angin yang melaluinya [12].

Terdapat tiga variasi khusus bentuk rotor Savonius dengan konfigurasi dua bucket, antara lain:

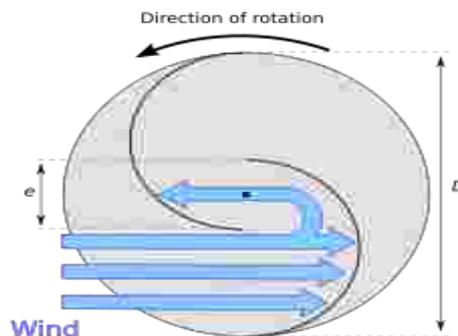
a) Konfigurasi tanpa *overlap*



Gambar 2.14 Savonius dua *bucket* tanpa *overlap* [11]

Konfigurasi rotor Savonius pada Gambar 2.14 tidak memiliki jarak celah antara kedua *bucket*nya. Rotor ini memiliki kekuatan yang tinggi dikarenakan letak porosnya yang tepat berada di tengah kedua *bucket*nya. Rotor dengan konfigurasi seperti ini memiliki efisiensi yang paling rendah dibandingkan dengan konfigurasi lainnya.

b) Konfigurasi dengan *overlap*

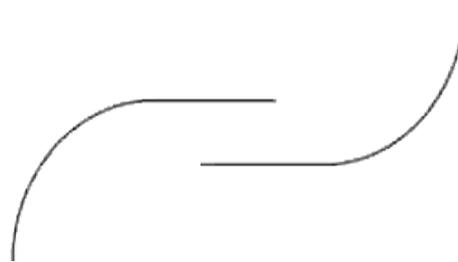


Gambar 2.15 Savonius dua *bucket* dengan *overlap* [11]

Konfigurasi rotor Savonius pada Gambar 2.15 merupakan konfigurasi yang paling sering dijumpai. Jenis rotor ini memiliki celah antar *bucket* sehingga membuat arah angin yang dapat meningkatkan putaran dan dapat mengurangi getaran.

Dengan konfigurasi *overlap*, rotor ini memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan rotor Savonius tanpa *overlap*.

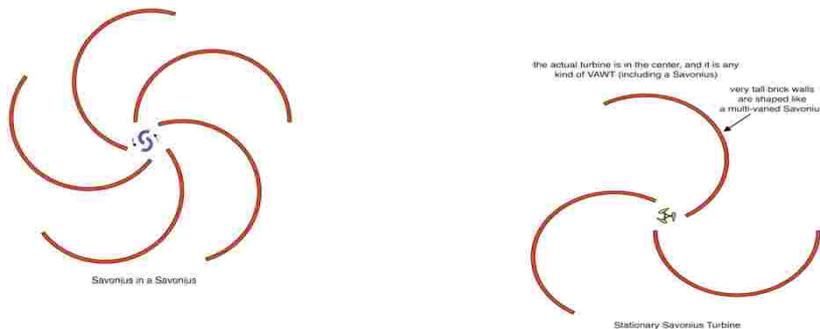
c) Konfigurasi dengan *bucket* didefleksikan



Gambar 2.16 Savonius dua *bucket* bentuk “L” dengan *overlap* [11]

Rotor Savonius tipe diatas mempunyai bentuk seperti huruf “L”. Rotor tersebut memiliki efisiensi yang lebih baik dibanding dengan rotor tipe pertama ataupun kedua. Tidak hanya keunggulan dalam membelokkan fluida, tetapi *bucket* seperti diatas mampu bertindak seperti airfoil ketika fluida menabrak tepi rotor dan menimbulkan sedikit gaya *lift*. Dengan demikian mampu meningkatkan efisiensi. Tetapi tipe diatas relatif sulit untuk dibuat karena membutuhkan lembaran logam yang di rol, bukan dari potongan drum atau pipa [12].

2.8.2 Rotor Savonius dengan Multi *Bucket*



Gambar 2.17 Savonius tiga *bucket* dan lima *bucket* [13]

Beberapa rotor Savonius yang pernah dikembangkan antara lain rotor Savonius dengan tiga, empat, bahkan lima *bucket*. Rotor Savonius dengan tiga *bucket* atau lebih, cenderung memiliki torsi awal yang baik daripada rotor savonius dengan dua *bucket*. Semakin banyak *bucket* yang digunakan, maka torsi awal yang dihasilkan akan semakin besar [14].

2.8.3 Rotor Savonius dengan Rotor *Helix*



Gambar 2.18 Rotor Savonius berbentuk heliks [15]

Rotor Savonius tipe ini pertama kali dikenalkan tahun 2006 oleh suatu perusahaan bernama “*Helix Wind*”. Rotor ini memiliki desain yang tidak biasa, yaitu berbentuk heliks. Namun bentuk *helix* disini memiliki keuntungan antara lain memiliki getaran yang halus karena variasi torsinya relatif merata untuk setiap *bucket*, dan juga memiliki torsi yang baik. Tetapi rotor tipe ini memiliki geometri yang relatif rumit, sehingga sulit dalam pembuatan [16].

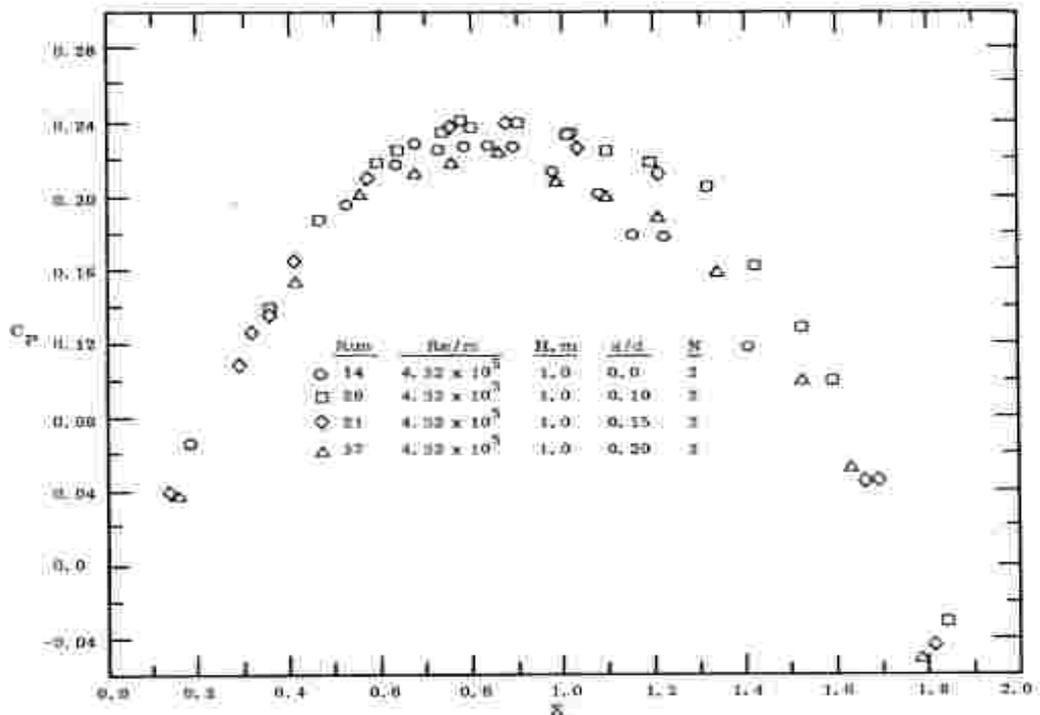
2.9 Performasi Rotor Savonius

Beberapa peneliti telah banyak melakukan pengujian dan pengembangan untuk meningkatkan performasi rotor Savonius. Ada beberapa parameter yang menentukan performasi dari rotor Savonius, diantaranya adalah:

1. Rasio overlap (*overlap ratio*)
2. Aspek rasio (*aspect ratio*)
3. Jumlah *bucket*
4. Tingkatan *bucket*

2.9.1 Rasio Overlap (*overlap ratio*)

Rasio *overlap* dari Turbin Savonius merupakan jarak *overlap bucket*, s dengan diameter Turbin Savonius, D . Adanya *overlap* pada Turbin Savonius memungkinkan fluida yang memasuki sisi cekung pada suatu *bucket* dapat mengalir ke sisi cekung *bucket* yang lainnya dan dapat menghasilkan tambahan tekanan. Pada gambar 2.19 rasio *overlap* di lambangkan dengan x dan koefisien power C_p .

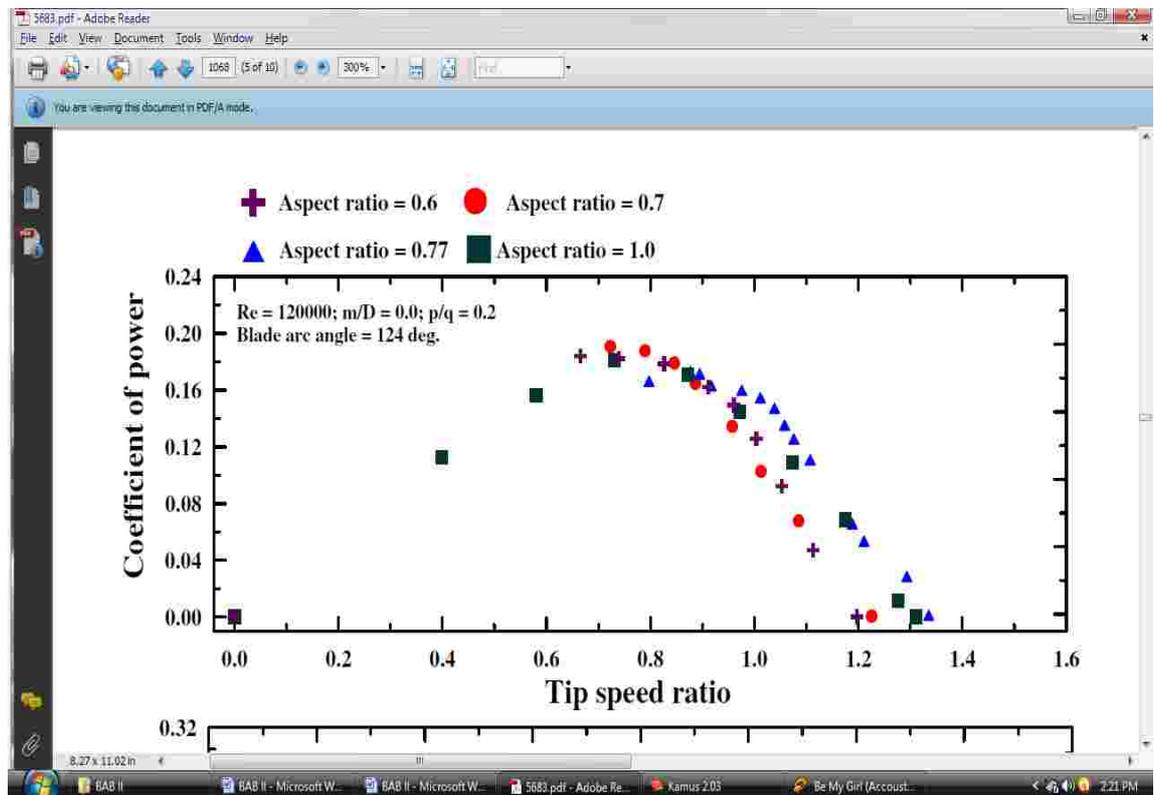


Gambar 2.19 Hubungan rasio *overlap* (x) dengan koefisien power (C_p) pada perbedaan kecepatan turbin [14]

Hubungan antara rasio *overlap* dengan koefisien power Turbin Savonius telah diteliti oleh Blackwell [14], dengan konfigurasi dua *bucket*, tinggi turbin 1 m, Diameter *bucket* 0,5 m dan diameter rotor nominal sebesar 1 m. Diketahui bahwa pada Re/m sebesar 432.000, dengan variasi rasio pada *gap* antara 0,1 dan 0,15 memberikan hasil yang optimum pada rasio *overlap* sekitar 0,85 yaitu sebesar 25 % [14].

2.9.2 Aspect Ratio

Aspect ratio dari rotor Savonius merupakan perbandingan antara tinggi dengan diameter rotor (H/D). M.A Kamoji telah melakukan pengujian dengan variasi tinggi dari *bucket* dengan nilai *overlap* yang sama, yaitu nol dengan nilai *aspect ratio* 0,6; 0,7; 0,77; dan 1,0. Gambar 2.20 menunjukkan grafik hubungan antara koefisien power dengan *speed ratio* dengan perbedaan *aspect ratio* pada bilangan reynold 120000.

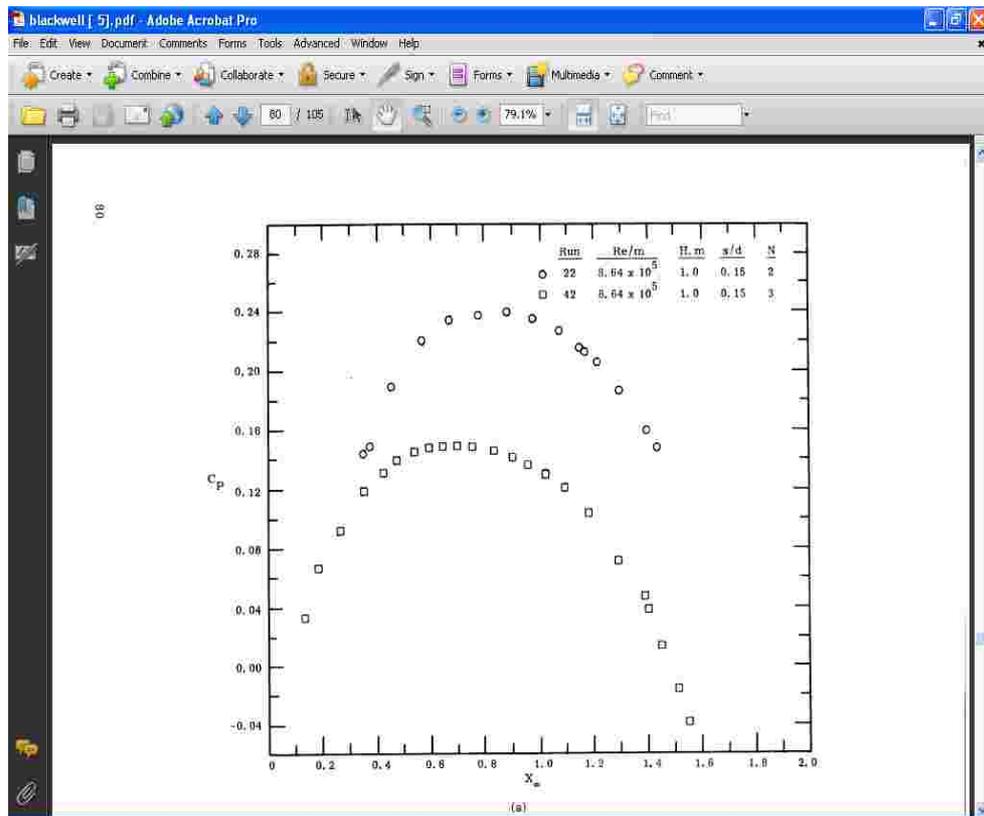


Gambar 2.20 Hubungan *speed ratio* turbin dengan koefisien power pada perbedaan jarak *aspect ratio* [18]

Aspect ratio 0,7 memiliki koefisien power paling besar yaitu sebesar 0,19 pada tip speed ratio sebesar 0,72. Selain diuji pada bilangan reynold 120000, *aspect ratio* 0,7 juga memiliki koefisien power paling besar 0,21 pada bilangan reynold 150000 [18].

2.9.3 Jumlah *Bucket*

Dalam penelitian yang dilakukan Blackwell [5] diketahui pengaruh jumlah *bucket* terhadap koefisien daya sebagai fungsi dari *tip speed ratio*. Model diuji pada *overlap ratio*, $s/d = 0,15$ pada bilangan Reynold, $Re = 8,64 \times 10^5$. Dari Gambar 2.21 menunjukkan bahwa konfigurasi rotor Savonius dengan jumlah 2 *bucket* lebih unggul dibandingkan dengan rotor dengan jumlah 3 *bucket*. Namun rotor dengan jumlah 3 *bucket* memiliki torsi awal yang lebih baik.

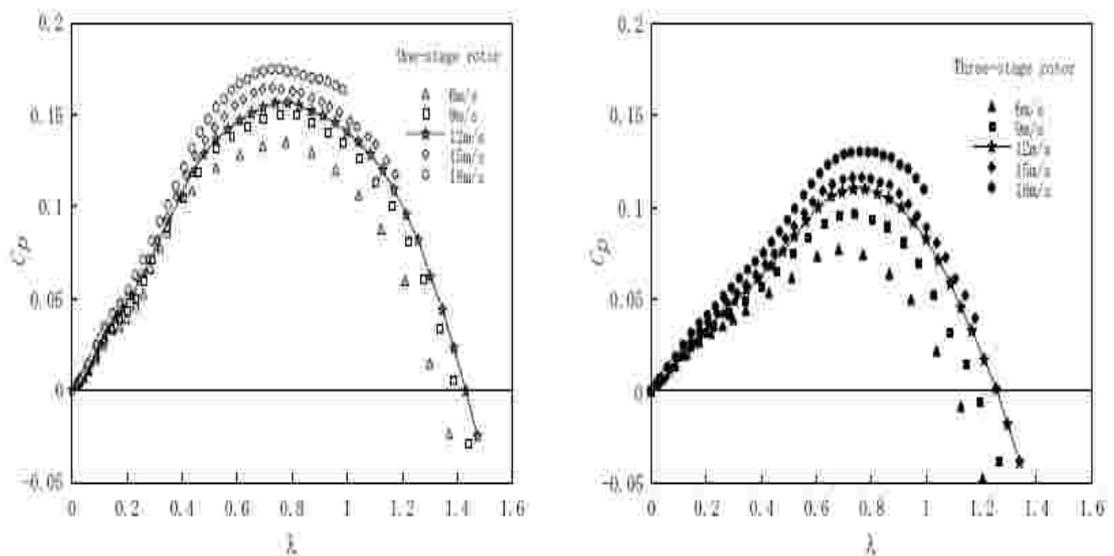


Gambar 2.21 Grafik koefisien power rotor dengan jumlah dua dan tiga *bucket* [14]

2.9.4 Tingkatan *Bucket*

Pada Pengujian yang dilakukan oleh Hayashi, yaitu membandingkan kinerja rotor Savonius satu tingkat dengan Savonius tiga tingkat. Model rotor Savonius satu tingkat dan tiga tingkat masing-masing diuji dengan kecepatan fluida yang bervariasi dari 6, 9, 12, 15, 18 m/s [19].

Pengujian ini dituangkan ke dalam grafik seperti Gambar 2.22 dan dapat diambil kesimpulan bahwa koefisien daya dari rotor Savonius satu tingkat lebih besar daripada koefisien daya tiga tingkat.



Gambar 2.22 Koefisien daya (C_p) terhadap *tip speed ratio* (λ) pada rotor Savonius satu tingkat(a) dan tiga tingkat(b) [19]

2.10 Keunggulan dan Kekurangan Rotor Savonius

Turbin Savonius memiliki beberapa keunggulan, antara lain:

1. Desainnya simpel dan biaya konstruksinya rendah.
2. Mampu menangkap fluida dari segala arah.
3. Memiliki *starting torque* yang tinggi.
4. Memiliki kecepatan operasi yang rendah (rpm).
5. Mudah dan murah dari segi perawatan.

Selain keunggulan-keunggulan diatas, turbin rotor Savonius juga memiliki beberapa kekurangan. Yang pertama, variasi torsi yang cukup besar menyebabkan getaran pada rotor dan akibatnya menurunkan daya ketahanan (*durability*) pada rotor. Kemudian yang kedua adalah ada beberapa posisi arah angular yang memiliki torsi statik bernilai negatif atau sangat rendah. Hal ini merupakan suatu kendala ketika rotor Savonius digunakan sebagai *starter*. Sebelumnya, beberapa peneliti terfokus pada bagaimana cara meningkatkan torsi karakteristik Savonius. Sheldahl melakukan uji terowongan angin pada rotor tiga *bucket*. Khan menumpuk sebuah rotor Savonius biasa dengan rotor lain dengan sudut pergeseran fasa 90° . Pada kedua penelitian tersebut, kisaran *negative starting torque* menurun dan variasi torsi menjadi sedikit lebih kecil dari rotor biasa. Namun nilai torsinya masih terhitung besar jika hanya digunakan sebagai *starter* [19].