MediaTeknika Jurnal Teknologi
Vol.11, No.1, Juni 2016,

Unjuk Kerja Model-Model Kincir Angin Savonius Dua Tingkat Dengan Kelengkungan Sudu Termodifikasi

Rines[1]
[1]Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi,
Universitas Sanata Dharma Yogyakarta
Kampus III, Paingan Maguwoharjo, Sleman - Yogyakarta
Email: mra@usd.ac.id

Abstract

Savonius windmill is a kind of vertical axis windmill which is potential used to capture the energy from the wind. This research's objective is to investigate about the dimension effects on the performance of the Savonius windmill models with modified curves and blades configuration. All of the models were made in two stages which each stage have two blades. Six dimension variations of windmill models has been made and investigated in range from 0.432 m^2 to 0.552 m^2. This research was conducted in a wind tunnel at wind speed range between 4 m/s to 7 m/s. The results showed that there were effects of the dimension of windmill on its performance. The lowest value of peak power coefficient is produced by a windmill model 92 cm of rotor,s diameter and 60 cm in height, that is about 0.31 at tip speed ratio 1.08. The highest one is produced by windmill model 60 cm of rotor,s diameter and 92 cm in height, that is about 0.49 at tip speed ratio 1.18.

Keywords*: Savonius windmill, power coefficient, tip speed ratio*

1. Pendahuluan

1.1 Latar belakang

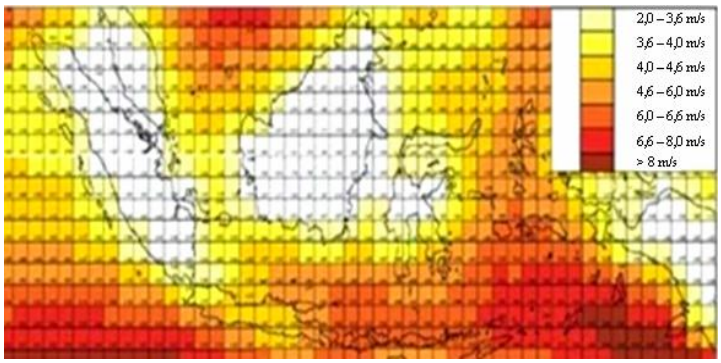
Pemakaian sumber energi yang berasal dari fosil, terutama bahan bakar minyak (BBM), hingga saat ini masih sangat dominan dibandingkan dengan pemakaian sumber-sumber energi lainnya. Padahal ketersediaan energi fosil ini, oleh beberapa ahli, diprediksi akan habis dalam satu atau dua dekade ke depan, bila tingkat penggunaannya tidak mengalami pengurangan. Permasalahan ini akan semakin bertambah besar, bila pertambahan penduduk dunia tidak terkendali, karena dengan demikian kebutuhan akan energi akan berlipat ganda. Di sisi lain, penggunaan energi fosil (BBM dan batu bara) yang berlebihan telah berdampak pada terjadinya pemanasan global dan efek rumah kaca yang telah mulai meresahkan penghuni bumi ini.

Berbagai upaya telah dan terus dilakukan oleh negara-negara di dunia untuk mengatasi permasalahan ini. Selain menemukan sumber-sumber energi baru dan terbarukan, usaha-usaha yang dilakukan pada umumnya juga bertujuan mengurangi dampak-dampak buruk yang diakibatkan oleh penggunaan sumber-sumber energi tersebut. Salah satu sumber energi terbarukan yang berpeluang untuk digunakan sebagai alternatif adalah energi angin (atau energi bayu). Angin sebagai sumber energi atau sebagai penggerak, sebenarnya telah lama dimanfaatkan manusia, misalnya digunakan sebagai penggerak kapal-kapal atau perahu-perahu layar, penggerak kincir-kincir yang selanjutnya digunakan untuk memutar alat-alat penggiling gandum atau sebagai penggerak pompa air. Selain dapat diperoleh dengan cuma-cuma, sumber energi jenis ini termasuk sumber energi yang ramah lingkungan.

Memang perlu diakui bahwa dalam pengembangan energi angin dan energi-energi terbarukan lainnya, banyak kendala yang harus dihadapi, seperti persoalan lingkungan alam,

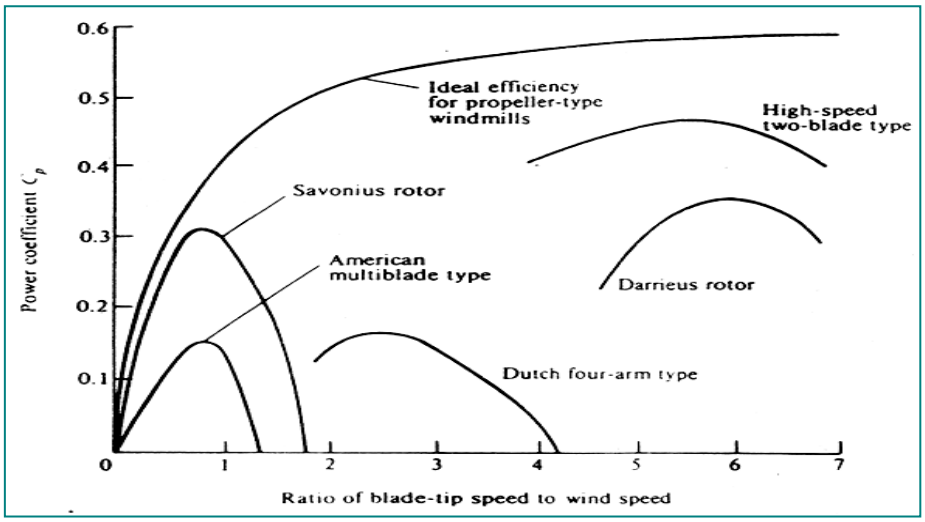
Diterima 11 April 2016; Direvisi 20 Juni 2016; Disetujui 7 Juli 2016

sosial, budaya, ekonomi, teknologi dan sebagainya. Khususnya dalam pemanfaatan energi angin, kecepatan angin yang berubah-ubah merupakan kendala utama dalam aplikasinya. Walaupun kecepatan angin di sekitar pantai atau lepas pantai cukup tinggi namun pendirian kincir atau turbin angin memerlukan bahan-bahan yang harus tahan terhadap korosi angin laut, teknologi tinggi dan biaya yang sangat tinggi. Namun bila didirikan di wilayah lain, persoalan yang muncul biasanya adalah kecepatan angin yang rendah, yang kurang bisa dimanfaatkan, terutama bila dikonversikan kedalam energi listrik.



Gambar 1. Peta potensi angin di wilayah Indonesia (Sumber:http://konversiwordpress.com,)

Secara umum kecepatan angin rata-rata tahunan di wilayah-wilayah Indonesia tergolong rendah, yakni berkisar 3 m/s hingga 4 m/s, seperti yang dapat dilihat dalam Gambar 1, sehingga kurang menguntungkan bila dipakai sebagai sumber energi untuk pembangkit listrik. Namun terdapat pula beberapa wilayah di Indonesia yang memiliki kecepatan angin tahunan rata-rata di atas 4,5 m/s, diantaranya adalah Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, Sulawesi Utara, Maluku Tenggara dan Barat serta pantai selatan Jawa, demikian hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Lapan) pada 120 lokasi di Indonesia (www.technology-indonesia.com, Nop 2007). Ini berarti, masih ada daerah-daerah tertentu yang berpotensi digunakan sebagai lokasi-lokasi pendirian pembangkit listrik dengan memakai sumber energi angin. Berbagai upaya juga telah dilakukan oleh lembaga-lembaga penelitian di Indonesia, seperti Lapan, yang telah mendirikan berbagai turbin angin di beberapa wilayah Indonesia. Sayangnya baru dapat dinikmati atau dirasakan manfaatnya oleh sebagian kecil masyarakat Indonesia.



Gambar 2. Kurva hubungan koefisien daya, C_p, dan *tip speed ratio*, tsr, untuk berbagai tipe kincir angin standard [1].

Salah satu alternatif yang mungkin dapat dilakukan untuk memecahkan masalah rendahnya kecepatan angin di sebagian besar wilayah Indonesia adalah mencari konstruksi kincir angin yang dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah tetapi memiliki efisiensi atau koefisien daya yang tinggi. Kincir-kincir angin berporos vertikal, terutama kincir angin tipe Savonius, merupakan jenis kincir angin yang dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah dan mampu menghasilkan torsi yang tinggi. Hal ini tersirat dari hasil perbandingan nilai koefisien daya puncak, $C_{p\max}$, dan nilai *tip speed rasio* optimal, $\mathrm{tsr}_{\mathrm{opt}}$, ($C_{p\max}/\mathrm{tsr}_{\mathrm{opt}}$). Kincir asli Savonius memiliki nilai $C_{p\max}/\mathrm{tsr}_{\mathrm{opt}} \approx 0{,}31/0{,}9 \approx 0{,}34$, paling tinggi diantara beberapa tipe kincir lainnya (Gambar 2).

Walaupun tidak seperti tipe-tipe kincir atau turbin propeler yang dapat digunakan secara langsung untuk menggerakkan generator (pembangkit) listrik, namun karena mampu menyediakan torsi yang besar pada kecepatan angin yang rendah, kincir tipe Savonius juga masih memungkinkan digunakan untuk menggerakkan generator listrik dengan menambahkan transmisi penaik putaran. Selain itu kincir tipe Savonius dapat dimanfaatkan untuk keperluan lain, seperti untuk menggerakkan pompa air, alat penggilingan, dan alat-alat lainnya yang hanya memerlukan gerakan lambat.

Sayangnya, informasi mengenai kincir angin Savonius yang ditunjukkan dalam Gambar 2, tidak dilengkapi detail konstruksi dan dimensi kincir. Misalnya dalam hal jumlah tingkat kincir: satu tingkat atau bertingkat; jumlah sudu yang digunakan: dua, tiga, empat atau lebih; hubungan ujung-ujung sudu bagian dalam: terhubung rapat pada bagian tengah-tengah kincir atau dibuat berrongga. Demikian pula diameter maupun tinggi kincir, tidak disebutkan secara jelas. Karena itulah, melalui penelitian ini akan dicoba diungkap bagaimana pengaruh variasi dimensi kincir terhadap unjuk kerja kincir yakni koefisien daya, C_p, atau efisiensi terhadap *tip speed ratio*, tsr. Variasi dimensi kincir yang dimaksud meliputi: tiga variasi tinggi rotor dengan diameter rotor yang sama dan tiga variasi diameter rotor dengan tinggi rotor yang sama.

1.2 Tinjauan Pustaka

Yusaku Kyozuka [2] telah melakukan penelitian terhadap unjuk kerja empat model kincir Savonius solo dua sudu dan mendapatkan bahwa koefisien daya maksimal tertinggi diperoleh pada model kincir yang memiliki celah diantara poros kincir dan tepi sudu terdalam pada jarak 4 mm (*overlap* nol) untuk ukuran jari-jari rotor kincir 134 cm, yakni sebesar 0,16 (16%). Kyozuka berupaya memperbaiki unjuk kerja kincir Darrieus solo yang lemah dalam hal torsi pengawalan dan kincir Savonius solo yang lemah dalam hal koefisien daya dengan cara mengkombinasikan kedua kincir tersebut. Sebelum dilengkapi sebuah mekanisme kopling satu arah (*rachet mechanism*) ditemukan bahwa walaupun ada perbaikan dalam hal torsi pengawalan, nilai koefisien daya maksimum yang dihasilkan oleh kombinasi Darrieus-Savonius pada tsr = 2,2 adalah 30% lebih rendah dibandingkan dengan kincir Darrieus solo, tetapi setelah dilengkapi dengan mekanisme tersebut koefisien daya maksimum yang dihasilkan 20% lebih rendah dari kincir Darrieus solo.

Penelitian serupa juga telah dilakukan oleh R. Gupta dan kawan-kawan [3]. Tujuan penelitian mereka juga untuk memperbaiki kekurangan-kekurangan yang dimiliki oleh kincir angin Darrieus solo dan kincir angin Savonius solo dengan cara mengkombinasikannya. Mereka meneliti tiga model kincir angin Savonius solo dua sudu, berukuran diameter 8 cm dan tinggi 20 cm, tanpa *overlap* dan dengan *overlap*. Hasil yang mereka peroleh agak berbeda dengan hasil yang diperoleh Kyozuka, dimana C_p maksimal tertinggi dihasilkan oleh kincir model overlap 20%, yakni sebesar 0,2 (20%) pada tsr sekitar 0,26. Demikian pula untuk kombinasi kincir Darrieus-Savonius (kincir Darrieus tiga sudu diletakkan di bagian bawah) yang berukuran menyeluruh sama dengan model Savonius solo, didapatkan bahwa C_p tertinggi diperoleh pada kombinasi dengan model overlap 20% pada bagian kincir Savonius, yakni sebesar 0,25 (25%) pada tsr sekitar 0,28. Namun dalam penelitian lanjutan, dengan memakai kincir Savonius tiga

sudu dan kincir Darrieus tiga sudu, mereka [4] mendapatkan hasil yang berbeda. Koefisien daya maksimum yang dihasilkan dari kombinasi kedua model kincir tersebut adalah 0,51 pada kondisi tanpa *overlap* pada kincir Savonius yang diletakkan di bagian atas.

Hasil penelitian lainnya diperoleh dari J. Sargolzaei [5], yang mengamati nilai-nilai C_p yang dihasilkan oleh enam model rotor kincir Savonius dua sudu dengan overlap nol yang masing-masing berukuran diameter 0,4 m dan tinggi 1,4 m. Sargolzaei menemukan bahwa jenis rotor dengan jarak pinggir dalam sudu dan poros yang sempit 3,2 cm adalah model yang memberikan nilai C_p yang paling tinggi, yakni 25,4 % pada tsr sekitar 0,8.

Lukiyanto dan Rines [6] telah meneliti pula mengenai unjuk kerja kincir empat model kincir angin tipe Savonius dengan variasi bentuk dan konfigurasi sudu. Keempat model kincir memiliki jumlah sudu yang sama (yakni, dua sudu) berukuran frontal sama, yaitu berdiameter 50 cm dan tinggi sudu 60 cm, dengan dan tanpa *overlap*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa bentuk sudu setengah lingkaran dengan *overlap* nol dan jarak pinggir dalam sudu dan poros 3 cm memberikan nilai koefisien daya maksimal tertinggi, yakni 0,11 (11%) pada tsr 1,2.

1.3 Dasar teori

Besarnya torsi atau momen putar yang dihasilkan oleh kincir angin berporos vertikal bergantung kepada besarnya perbedaan gaya dorong (*drag force*) yang diberikan oleh angin pada kedua bagian sudu kincir yang berseberangan. Dengan menciptakan beban pengereman pada poros kincir melalui sebuah mekanisme yang tersusun dari transmisi puli dan sabuk, di saat kincir berputar, dapat diukur besarnya gaya tangensial pada jarak tertentu dari pusat poros kincir yang timbul akibat beban torsi yang diberikan. Besarnya torsi yang ditanggung oleh poros kincir dihitung berdasarkan rumus berikut:

$$T = F_t \cdot r_t \tag{1}$$

yang dalam hal ini, T adalah torsi atau beban yang ditanggung poros kincir, F_t adalah gaya lawan torsi terukur, dan r_t adalah panjang lengan torsi dari sumbu poros kincir.

Daya output pada poros kincir, P_{out}, dihitung berdasarkan torsi terhitung, T, dan kecepatan anguler poros kincir, ω, yang dihasilkan atau terukur selama diberi hembusan angin dengan kecepatan tertentu yang dapat dituliskan sebagai,

$$P_{\text{out}} = T.\omega \tag{2}$$

Besarnya daya output yang dihasilkan oleh kincir ini selanjutnya dibandingkan dengan daya teoritis yang diberikan oleh angin, P_w, yang dapat ditentukan dari rumus berikut [7]:

$$P_w = \tfrac{1}{2}\rho v_w^3 A \tag{3}$$

yang dalam hal ini, P_w adalah daya teoritis yang diberikan angin, ρ adalah rapat massa udara, v_w adalah kecepatan angin, dan A adalah luas frontal atau luas proyeksi permukaan kincir yang menghadap arah gerakan angin.

Koefisien daya (*power coefficient*) yang dihasilkan kincir, C_p, selanjutnya dapat dirumuskan menjadi

$$C_P = \frac{P_{\text{out}}}{P_w} \tag{4}$$

Koefisien daya ini akan digambarkan dalam hubungannya dengan *tip speed ratio*, tsr, yang merupakan perbandingan kecepatan keliling lingkar terluar rotor kincir dan kecepatan angin, v_w,

$$\text{tsr} = \frac{\text{kecepatan lingkar terluar kincir}}{\text{kecepatan angin}} = \frac{\omega \cdot r_k}{v_w} \tag{5}$$

yang dalam hal ini, ω adalah kecepatan anguler rotor kincir, dan r_k adalah jari-jari rotor kincir.

1.4 Tujuan Penelitian

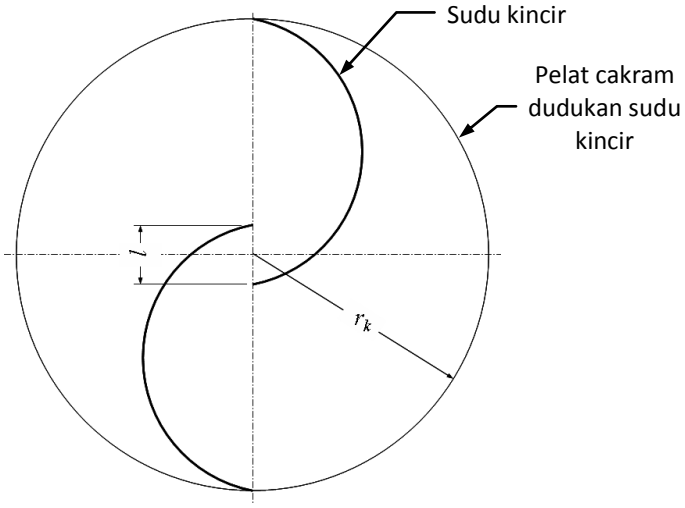
Penelitian ini diadakan dengan tujuan-tujuan sebagai berikut:

1. Mengkaji pengaruh perbandingan tinggi dan diameter kincir angin Savonius dua tingkat untuk enam variasi model dalam dua kelompok variasi, yakni kelompok dengan diameter 60 cm dan kelompok dengan ketinggian 60 cm, dengan kelengkungan sudu 45% bagian dari keliling lingkaran, terhadap koefisien daya puncak yang dihasilkan.
2. Mendapatkan model rotor kincir yang memiliki nilai koefisien daya puncak paling tinggi dan paling rendah dengan nilai-nilai *tip speed ratio* optimal terkait, diantara seluruh variasi ukuran model rotor kincir angin tipe Savonius yang diteliti.

2. Metode Penelitian

2.1 Bentuk dan Ukuran Model Kincir

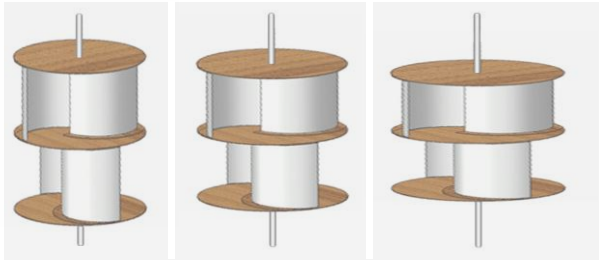
Bentuk belahan penampang lintang model-model kincir yang dibuat dan diuji adalah seperti yang ditunjukkan secara skematis dalam Gambar 3. Semua model kincir dibuat dalam dua tingkat. Lengkungan sudu-sudu kincir dibuat berbentuk busur lingkaran yakni 45% bagian dari keliling lingkaran. Diantara ujung-ujung sudu yang berhadapan di tengah-tengah kincir dibuat dengan *over lap*, l, yang besarnya ditetapkan 25% dari jari-jari kincir, $l = 0{,}25\ r_k$.



Gambar 3. Skema bentuk belahan penampang lintang model kincir angin dan konfigurasi sudu model kincir yang diselidiki.

Tabel 1 Ukuran diameter dan tinggi model-model rotor kincir yang dibuat dan diselidiki.

No.	Kincir Model	Diameter rotor (cm)	Tinggi rotor (cm)
1	I	60	72
2	II	60	82
3	III	60	92
4	IV	92	60
5	V	82	60
6	VI	72	60



(*a*) (*b*) (*c*)

Gambar 4. Tiga buah contoh desain tiga model rotor kincir yang diselidiki: (*a*) Kincir model langsing, (*b*) Kincir model dengan proporsi sedang, dan (*c*) Kincir model melebar.

Jumlah variasi model kincir yang dibuat dan diselidiki adalah sebanyak enam buah, dengan ukuran diameter dan tinggi rotor seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1. Gambar 4 menunjukkan tiga contoh porsi dimensi model rotor kincir yang berbeda, yakni rotor kincir model langsing, model dengan proporsi sedang dan model melebar. Kincir model langsing (Gambar 4*a*) memiliki ukuran tinggi rotor yang lebih besar dari ukuran diameter rotornya, tetapi kincir model melebar sebaliknya, memiliki ukuran diameter rotor yang lebih besar dari ukuran tinggi rotornya (Gambar 4*c*).

2.2 Bahan, Alat dan Langkah-langkah Penelitian

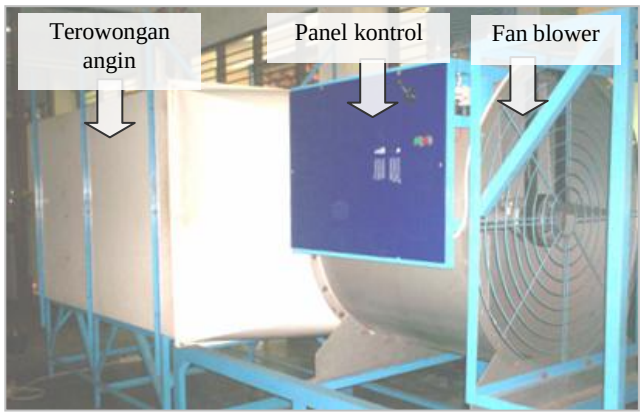
Secara umum, bahan yang dipakai untuk membuat model-model rotor kincir ini adalah bahan-bahan yang mudah didapatkan di pasar-pasar lokal. Sudu kincir (lihat Gambar 3 dan Gambar 4) dibuat dari pelat lembaran seng komersial. Poros kincir dibuat dari pipa berdiameter 1 inci. Pelat cakram untuk dudukan dan sekat antar tingkat rotor dibuat dari papan triplek dengan ketebalan 6 mm. Demikian pula pelat penahan sudu pada dudukannya menggunakan bahan triplek dengan tebal 6 mm. Dalam Gambar 5 ditunjukkan model-model rotor kincir yang berhasil dibuat.



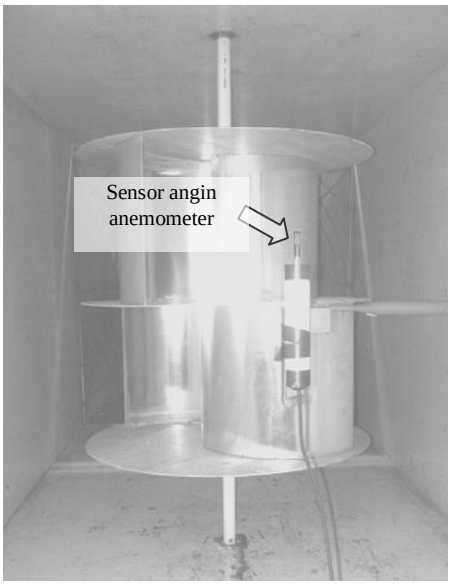
Gambar 5. Model-model rotor kincir angin dengan berbagai variasi dimensi yang dibuat dan diselidiki dalam penelitian.

Seluruh pengujian dilakukan dengan menggunakan sebuah terowongan angin berukuran ruang buka 120 cm × 120 cm. Terowongan angin, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 6 dilengkapi dengan sebuah *fan blower* dengan kapasitas daya 5,5 kW, yang mampu menghasilkan kecepatan angin hingga 7 m/s. Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 7, model

kincir angin dipasang di dalam terowongan angin dengan ditopang oleh bantalan-bantalan yang dipasang pada rangka atas dan bawah terowongan angin. Kecepatan angin diukur dengan menggunakan anemometer (Gambar 7) yang dipasang di depan kincir angin pada jarak sekitar 1,2 m dari kedudukan poros kincir.



Gambar 6. Terowongan angin yang digunakan dalam penyelidikan unjuk kerja model-model kincir angin.



Gambar 7. Instalasi salah satu kincir model di dalam terowongan angin.

Takometer, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 8*b*, digunakan untuk mengetahui putaran per menit rotor kincir, dengan demikian rasio kecepatan lingkar terluar (*blade-tip speed*) rotor kincir terhadap kecepatan angin (*wind speed*), yang dikenal sebagai *tip speed ratio*, tsr, pada kondisi pengujian dapat ditentukan.

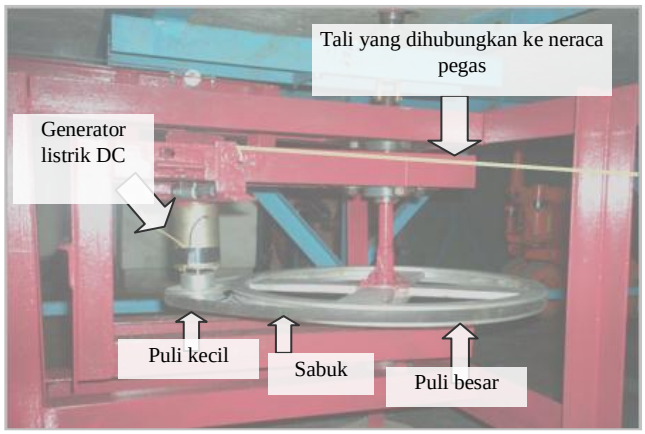
Kincir angin diberi beban pengereman melalui penggunaan sebuah mekanisme yang dipasang pada poros kincir. Mekanisme rem, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9 tersusun dari transmisi sabuk dan puli dan generator listrik yang terhubung dengan poros puli kecil. Peralatan ini ditempatkan di bawah terowongan angin, yang dalam hal ini poros puli besar terhubung dengan poros kincir melalui kopling Cardan (*universal joint*). Besar beban pengereman dibuat bervariasi dengan cara membebani generator dengan lampu-lampu yang jumlahnya divariasikan. Lampu-lampu yang digunakan disusun berderet dan terpasang pada sebuah panel lampu, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 10. Sembilan buah lampu pada

deretan paling atas memberikan beban daya masing-masing 3 watt. Sembilan buah lampu berikutnya, pada deretan tengah, memberikan beban daya masing-masing sebesar 5 watt. Lainnya, dalam jumlah yang sama, lampu-lampu pada deretan bawah memberikan beban daya masing-masing 10 watt.

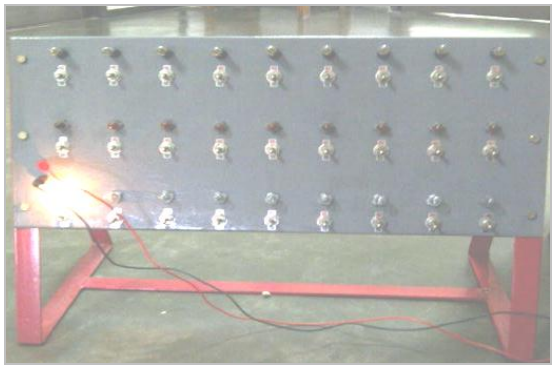


(*a*) (*b*) (*c*)

Gambar 8 (*a*) Anemometer beserta sensor kecepatan, (*b*) takometer, dan (*c*) neraca pegas yang secara berturut-turut digunakan untuk mengukur kecepatan angin, putaran rotor kincir dan gaya pengimbang torsi.



Gambar 9. Mekanisme rem yang digunakan untuk memberi beban pada rotor kincir angin.

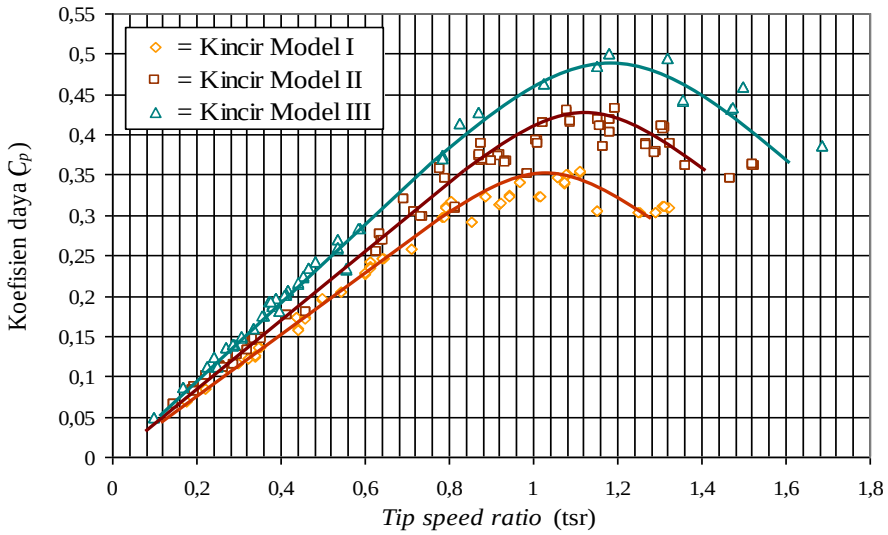


Gambar 10 Susunan atau deretan lampu-lampu yang terpasang pada sebuah panel lampu, yang digunakan bervariasi untuk memberi beban pada generator yang selanjutnya diteruskan ke poros kincir dalam rupa beban pengereman.

Ketika kincir berputar dan generator diberi beban lampu-lampu, poros puli kecil akan menerima beban pengereman yang selanjutnya akan diteruskan ke poros kincir. Torsi yang dihasilkan dari beban pengereman tersebut selanjutnya dapat ditentukan dengan mengukur gaya tangensial pada jarak tertentu dari sumbu poros kincir. Dalam penelitian ini jarak pengukuran gaya ditetapkan sejauh 20 cm dari sumbu poros kincir. Besar gaya pengimbang torsi ini diukur dengan memakai neraca pegas yang dipasang pada dinding luar terowongan angin dalam posisi menggantung, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 8(*c*). Dalam Gambar 9 ditunjukkan seutas tali yang menghubungkan rangka transmisi sabuk dan puli, yang dapat mengayun ketika aksi pengereman diberikan, dengan neraca pegas melalui sebuah katrol kecil.

2. Hasil dan Pembahasan

Karena terbatasnya ruang, maka data numeris yang diperoleh dalam penelitian ini tidak memungkinkan untuk disajikan dalam tulisan ini. Namun, dalam Gambar-gambar 11, 12, dan 13 dapat dilihat titik-titik hasil perhitungan untuk tiap-tiap data hasil pengukuran yang terkait dengan koefisien daya, C_p, dan *tip speed ratio*, tsr. Gambar-gambar ini juga menunjukkan kurva-kurva pendekatan hubungan koefisien daya dan *tip speed ratio* masing-masing untuk tiga variasi model rotor kincir yang diteliti.



Gambar 11 Perbandingan kurva pendekatan hubungan koefisien daya (C_p) dan *tip speed ratio* (tsr) antara model-model rotor kincir berdiameter sama (60 cm): model I, model II,dan model III.

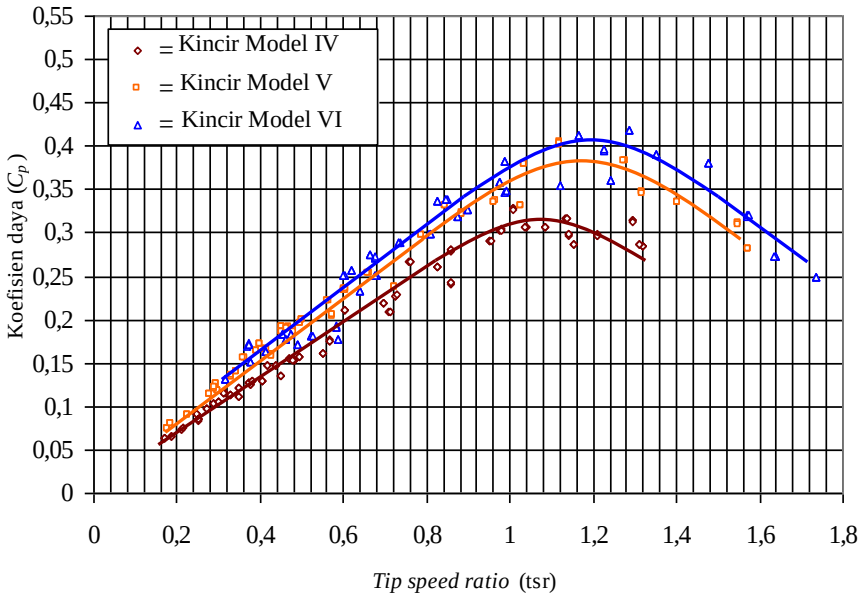
Gambar 11 menunjukkan kurva-kurva pendekatan hubungan koefisien daya dan tsr untuk tiga variasi ketinggian rotor model kincir dengan diameter yang sama. Dalam gambar ini tampak memberikan indikasi adanya perbedaan nilai koefisien daya puncak yang dihasilkan oleh masing-masing model rotor. Dalam jangkauan ukuran rotor yang diselidiki, nilai koefisien daya puncak kincir menunjukkan peningkatan dengan bertambahnya ketinggian atau rasio kelangsingan rotor. Namun tampak pula bahwa kecenderungan meningkatnya nilai koefisien daya puncak tersebut semakin mengecil bila tinggi rotor terus diperbesar dan diperkirakan akan mencapai nilai tertinggi pada nilai ketinggian rotor tertentu. Dengan kata lain, masih ada kemungkinan untuk mendapatkan nilai koefisien daya puncak yang lebih tinggi dari nilai tertinggi yang ditunjukkan dalam Gambar 11 dengan cara menambah ketinggian rotor. Hal ini masih perlu dibuktikan melalui penelitian lebih lanjut.

Dari ketiga model rotor kincir, nilai koefisien daya puncak terrendah dihasilkan oleh kincir model I, yakni sekitar 0,35. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan dengan nilai koefisien daya

untuk rotor kincir Savonius standar seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2, yakni sekitar 0,31. Koefisien daya puncak yang dihasilkan oleh kincir model III, yakni sekitar 0,49, yang berarti 58% lebih tinggi dari yang dihasilkan oleh rotor kincir Savonius standar. Tampak bahwa porsi ukuran dan modifikasi yang diberikan pada model-model rotor kincir ini memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan unjuk kerja kincir, khususnya koefisien (efisiensi) daya puncak yang dihasilkan.

Bila dihubungkan dengan beban atau torsi yang dibawa kincir saat mencapai koefisien puncak, hal ini dapat dievaluasi dari luas frontal rotor dan perbandingan koefisien daya puncak terhadap tsr optimal ($C_{p\max}$/ tsr_{opt}). Luas bidang frontal rotor kincir model III sama dengan 0,92/0,72 = 1,28 kali lebih besar dari luas bidang frontal rotor kincir model I. Nilai $C_{p\max}$/ tsr_{opt} untuk rotor model I adalah sebesar 0,34/1,04 = 0,327, sedangkan untuk rotor model III, mencapai 0,49/1,18 = 0,415 yang 1,27 lebih besar dari rotor model I. Dengan demikian rotor kincir model III mampu membawa beban atau torsi optimal 1,63 kali lebih besar dari rotor kincir model I.

Ragam variasi ukuran berikutnya yang diselidiki dalam penelitian ini adalah variasi diameter model rotor kincir dengan tinggi kincir yang sama. Hasil-hasil yang diperoleh ditunjukkan dalam Gambar 12. Kembali didapati bahwa semakin langsing rotor kincir, sebatas tiga model rotor yang diselidiki, semakin besar pula koefisien daya puncak yang dihasilkan. Namun peningkatan koefisien daya puncak tersebut tampak semakin mengecil.



Gambar 12 Perbandingan kurva pendekatan hubungan koefisien daya (C_p) dan *tip speed ratio* (tsr) antara kincir-kincir dengan *tinggi rotor yang sama* (60 cm): model IV, model V, dan model IV.

Secara garis besar, nilai-nilai koefisien daya puncak yang dihasilkan oleh enam model atau variasi ukuran rotor kincir yang diteliti dan kaitannya dengan nilai tsr optimal disajikan dalam Tabel 3. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa dari keenam model rotor kincir yang diteliti, koefisien daya puncak tertinggi dicapai oleh model rotor III, yakni sebesar 0,49 pada nilai tsr = 1,18. Dengan kata lain, prestasi atau unjuk kerja terbaik diberikan oleh kincir berukuran paling langsing. Sebaliknya, koefisien daya puncak terendah dihasilkan oleh model rotor IV, yakni sebesar 0,31 pada nilai tsr = 1,08, yang merupakan model rotor kincir dengan ukuran paling melebar diantara model-model lainnya.

Tabel 3 Rangkuman nilai-nilai koefisien daya puncak ($C_{p\ \max}$) yang dihasilkan oleh model-model rotor kincir yang diselidiki, kaitannya dengan *tip speed ratio* optimal (tsr_{opt}).

No.	Rotor Model	d (cm)	h (cm)	$C_{p\max}$	tsr_{opt}
1	I	60	72	0,34	1,04
2	II	60	82	0,43	1,14
3	III	60	92	0,49	1,18
4	IV	92	60	0,31	1,08
5	V	82	60	0,38	1,14
6	VI	72	60	0,40	1,2

3. Kesimpulan

Mengacu pada tujuan penelitian dan berdasarkan pada hasil-hasil yang diperoleh, serta dalam batas-batas ukuran yang dapat dijangkau dalam penelitian ini, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan, sebagai berikut:

(a) Baik untuk model-model rotor kincir berdiameter sama dengan ketinggian yang berbeda-beda, maupun untuk model-model dengan ketinggian yang sama dengan diameter yang berbeda-beda, dapat disimpulkan bahwa, semakin besar rasio ketinggian terhadap diameter atau semakin langsing rotor tersebut, maka semakin tinggi koefisien daya puncak yang dihasilkan oleh rotor kincir terkait.

(b) Koefisien daya puncak paling tinggi dicapai oleh rotor kincir model III yang paling langsing diantara yang lain dengan diameter rotor 60 cm dan tinggi rotor 92 cm, yakni sekitar 0,49 pada *nilai tip speed ratio* 1,18 dan koefisien daya puncak paling rendah dihasilkan oleh rotor kincir model IV yang memiliki ukuran yang paling melebar, yakni sekitar 0,31 pada nilai *tip speed ratio* 1,08.

Daftar Pustaka

[1] G.L. Johnson, 2006, Wind Energy Systems, Book 1, Electronic Edition, Manhattan, K.S. http://www.eece.ksu.edu/~gjohnson/.

[2] Y. Kyozuka, 2008, An Experimental Study on Darrieus-Savonius Turbine for Tidal Current Power Generation, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol 3, No. 3, 439-449.

[3] R. Gupta, 2006, Experimental Study of a Savonius-Darrieus Wind Machine, *Proceeding of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries*, Washington D.C.

[4] R. Gupta, A. Biswas , K.K. Sharma, 2007, Comparative Study of a Three-Bucket Savonius Rotor with a Combined Three-Bucket Savonius – Three-bladed Darrieus Rotor, *Journal of Renewable Energy*, Vol. 33, Issue 9, ScienceDirect site, Elsevier Ltd, Amsterdam, hal 1974-1981.

[5] J. Sargolzaei, 2007, Prediction of the Power Ratio in Wind Turbine Savonius Rotors Using Atificial Neural Network, *International Journal of Energy and Environment*, Issue 2, Vol 1, hal. 51-56.

[6] Y.B. Lukiyanto, dan Rines, 2009, *Efisiensi Kincir Angin Savonius dengan Berbagai Bentuk Geometri Sudu*, Laporan Penelitian, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Sanata Dharma, Yogyakarta.