

KONTROL KECEPATAN TURBIN ANGIN DENGAN DAYA-SENDIRI

Ali Mashar*, Dja'far Sodik**, Lalu Irlan J.**, Ichsah Ramadhan**

*Jurusan Teknik Konversi Energi– Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir Ds. Ciwaruga Bandung, Telp. 022-2013789, ekst. 150, Fax. 022-2013889, email: amashar69@yahoo,

** Jurusan Teknik Konversi Energi – Politeknik Negeri Bandung

Abstrak

Salah satu masalah pada pembangkit listrik tenaga angin (PLT Angin) adalah bagaimana mengendalikan kecepatan turbin angin ketika kecepatan angin melebihi kecepatan maksimum untuk turbin. Sudah banyak sistem kendali diterapkan, seperti: sistem kontrol hidrolis dan yaw angle. Sistem kontrol hidrolis akan melakukan pengereman turbin sampai dengan menghentikannya bila kecepatan angin melebihi kecepatan maksimumnya, sedangkan sistem kendali yaw angle merupakan kontrol mekanik yang mengatur sudut kemiringan sudu turbin, semakin tinggi kecepatan angin semakin besar sudut kemiringan turbin terhadap sudut datang angin sehingga kecepatan turbin tetap terjaga pada kondisi setpointnya. Berbeda dengan kedua kontrol tersebut, sistem kontrol yang diusulkan ini menggunakan eddy current brake sebagai unit pengerem dan sistem kontrol untuk mengendalikan kekuatan pengeremannya sehingga kecepatan turbin tetap terjaga pada harga setpointnya walaupun kecepatan angin melampaui kecepatan maksimumnya. Sistem kontrol ini tidak melibatkan kontrol mekanik sehingga konstruksinya jauh lebih sederhana karena menggunakan listrik sebagai sinyal kontrolnya. Kontrol ini juga tidak memerlukan sumber dari luar atau mampu mendayai sendiri (*self-powered*) langsung dari listrik yang dibangkitkan generator. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan sistem dapat bekerja dengan baik dan kontrol ini mampu menjaga kecepatan turbin pada harga setpointnya walaupun kecepatan angin melebihi dari kecepatan nominal turbin.

Kata kunci: PLT Angin, yaw angle, daya sendiri, eddy current brake.

1. PENDAHULUAN

Sudah banyak jenis PLT Angin yang diterapkan di Indonesia walaupun masih dalam skala kecil. Dalam pengoperasiannya masih banyak ditemukan permasalahan di antaranya adalah masih banyaknya PLT Angin yang mengalami kerusakan sebelum waktunya. Kerusakan yang terjadi pada umumnya terletak pada baterai penyimpan energi dan mekanik turbin, khususnya pada porosnya.

Produk-produk PLT Angin yang masuk dalam kategori mutakhir, sudah dilengkapi dengan unit pengontrol baik untuk pengontrol tegangan pengisian baterai maupun kontrol kecepatan untuk mengatasi kecepatan angin yang berlebih. Pengendali tegangan baterai menggunakan *Battery Control rectifier* (BCR). Dengan BCR ini baterai akan terlindungi dari kondisi *overcharged*. Sedangkan untuk proteksi terhadap kecepatan angin yang berlebih juga sudah banyak diterapkan, tapi mengapa masih terjadi permasalahan seperti yang telah disampaikan di atas. Memang belum dilakukan kajian khusus tentang bagian-bagian kerusakan secara mendalam. Namun dilihat dari gejala yang ada dapat disampaikan hal-hal sebagai berikut:

1. Kerusakan baterai. Ada banyak kemungkinan yang menyebabkan terjadinya kerusakan pada baterai.

Namun dalam konteks ini kemungkinan terbesar adalah karena baterai mengalami *overcharged*. Penyebab dari kejadian ini yang terbesar kemungkinannya adalah tidak berfungsinya BCR dalam mengontrol tegangan pengisian. Gagalnya BCR bisa jadi akibat dari tegangan lebih yang berkelanjutan dari generator akibat putarannya berlebih.

2. Kerusakan bagian mekanik (bantalan) turbin. Poros dan bantalan turbin merupakan bagian dari turbin yang paling berat dalam menanggung perubahan arah dan kecepatan angin. Perubahan arah angin akan mengakibatkan tingginya gaya puntir terutama pada poros sedangkan kecepatan angin yang berlebih akan berakibat meningkatnya putaran turbin. Peningkatan kecepatan turbin yang melampaui batas maksimumnya pasti akan berdampak negatif pada sistem mekanik turbin khususnya bantalannya.

Makalah ini akan mengkaji konteksnya dengan kecepatan angin yang berlebih. Mengapa, karena penyebab dari kerusakan-kerusakan tersebut sangat dimungkinkan akibat dari kecepatan angin yang berlebih sehingga membuat turbin melampaui batas maksimumnya.

Daya Turbin Angin

Dalam PLT Angin, ada rentang kecepatan angin yang ditetapkan sebagai spesifikasi teknis, yaitu batas kecepatan angin terendah atau *cut in speed* dan kecepatan angin nominal. Kecepatan angin terendah merupakan kecepatan angin di mana PLT Angin mulai membangkitkan tenaga listrik (dalam keadaan tanpa beban) dan batas kecepatan angin nominal merupakan kecepatan di mana generator membangkitkan daya nominalnya [1]. Daya kinetik angin dalam [2] diformulasikan sebagai:

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{1}{2} m V^2 \\
 &= \frac{1}{2} (\rho A V) V^2 \\
 &= \frac{1}{2} \rho A V^3
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

di mana:

- W = daya angin
- m = aliran massa
- V = kecepatan angin
- A = luas sapuan propeller
- ρ = kerapatan udara

Namun karena tidak mungkin semua udara dapat ditangkap oleh propeller, dan berdasarkan Betz Limit bahwa udara yang dapat ditangkap maksimum adalah 59% dari total daya udara. Oleh karena itu, daya angin kemudian dirumuskan kembali menjadi:

$$W = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \tag{2}$$

di mana $C_p = \text{Betz Limit} = 59\%$.

Formula praktis tentang daya yang dapat dimanfaatkan dari tenaga angin juga diberikan dalam [3], di mana daya angin adalah:

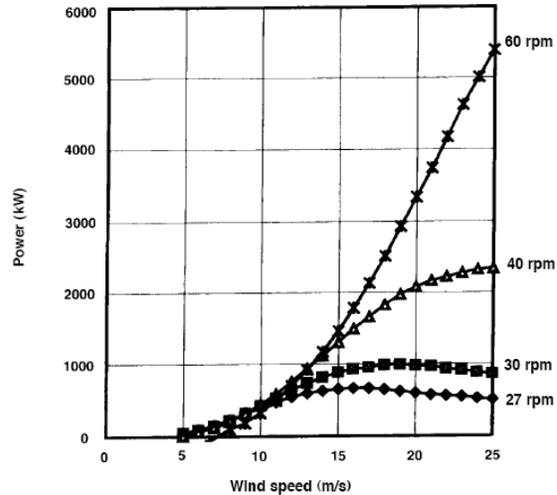
$$P = 0,0015 A V^3 \tag{3}$$

di mana:

- P = daya [W]
- 0,0015 = kerapatan udara x 50% efisiensi mesin/2
- A = luas sapuan propeller [feet²]
- V = kecepatan angin [mph]

Berdasarkan rumus-rumus ini terlihat jelas bahwa daya turbin angin berbanding lurus dengan luas sapuan bilah (*blade*), A dan kecepatan pangkat tiga, V^3 . Anggap luas sapuan blade turbin tetap, maka kecepatan angin akan menentukan daya keluaran suatu turbin. Bila kecepatan angin 2 kali kecepatan semula, berarti daya keluaran akan menjadi $2^3 = 8$ kali daya semula.

Dalam [4][6] juga menguatkan pemikiran-pemikiran ini sebagaimana yang disajikan pada Gambar 1. Ini merupakan hasil pengukuran bagaimana daya keluaran suatu turbin angin yang meningkat berkali-kali lipat bila putarannya meningkat. Hal ini sebenarnya yang sangat berbahaya bila kecepatan ini tidak terkendali.



Gambar 1 Kurva Daya pada Putaran yang Berbeda-beda

Dalam kaitannya dengan masalah ini, dalam [4] juga dibahas secara rinci tentang aspek kontrol dan safety dari suatu turbin angin dengan kapasitas besar. Aspek kontrolnya diarahkan pada kondisi kerja paralel dengan suatu sistem grid (jaringan) sehingga aspek putarannya akan dijaga oleh sistem grid tersebut. Apa yang terjadi bila turbin terlepas dari grid? Pendekatan yang digunakan untuk mengatasi masalah ini adalah menggunakan metoda *Tip-Brakes* dan *Mechanical-Brakes*, yang keduanya akan bereaksi ketika kecepatan putaran turbin angin melebihi harga maksimumnya, yaitu akan mengerem dan menghentikan *blade* turbin angin. Dari sini terlihat bahwa sistem ini lebih diarahkan pada aspek safety. Sistem ini sangat kompleks dan biasa digunakan pada sistem yang berkapasitas besar (tipikal di atas 500 kW).

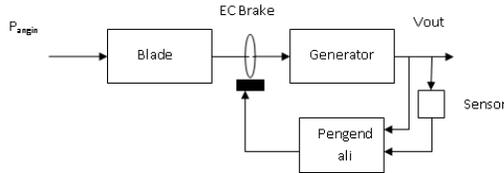
Salah satu produk turbin angin yang banyak diterapkan di Indonesia pada saat ini adalah Wind Turbine Generator, Model FD2.5-300 WJ seperti yang dimuat dalam [5]. Untuk melakukan pengaturan kecepatannya, alat ini dilengkapi dengan sistem mekanik yang dapat menyesuaikan posisi blade dengan arah angin (*yaw angle*), dengan *yaw angle* 0° pada kondisi kecepatan angin normal ($V < 12$ m/s) (*blade* tegak lurus arah angin), 45° untuk $V: 12-18$ m/s sampai dengan 90° untuk $V > 18$ m/s (*blade* sejajar dengan arah angin). Dari sini terlihat jelas bahwa untuk mempertahankan kecepatan turbin dari kondisi kecepatan angin yang berlebih sistem mekanik turbin ini akan bekerja ekstra keras dan faktor inilah yang disinyalir banyak berkontribusi pada tinggi angka keagalannya.

Berbeda dengan sistem-sistem kontrol yang dibahas di atas, sistem yang diusulkan ini menggunakan kontrol elektromekanik dengan *eddy current brake* (ECB) sebagai pengeremnya.

Dengan sistem yang diusulkan ini BCR dan sistem mekanik turbin akan lebih ringan bebannya dalam menjalankan fungsinya.

Sistem Pengendalian yang diusulkan

Tujuan pengendalian dalam hal ini adalah untuk menjaga agar putaran turbin angin tetap pada kecepatan nominalnya ketika kecepatan angin berlebih. Strategi pengendalian yang diusulkan secara skematik ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Strategi Kontrol Kecepatan Turbin Angin yang diusulkan

Strategi pengendalian kecepatan dilakukan sebagai berikut. Bila kecepatan angin meningkat, tegangan keluaran generator juga akan meningkat. Bila kecepatan angin berlebih maka kecepatan turbin juga akan mengalami kelebihan. Ketika kecepatan turbin mulai melebihi batas maksimum yang diset pengendali mulai aktif. Aktifnya pengendali ini ditandai dengan masuknya daya keluaran generator ke unit pengendali, kemudian unit pengendali ini menyalurkan kelebihan daya ini ke eddy current brake. Dengan adanya daya yang masuk ke ECB, maka ECB akan aktif dan mengerem laju kecepatan turbin. Semakin tinggi kelebihan kecepatan turbin semakin tinggi pula daya yang masuk ke ECB sehingga daya pengeremannya juga akan meningkat dan menghambat laju putaran turbin. Pengendalian daya dari generator ke ECB dikendalikan oleh unit kontrol otomatis yang selalu melakukan koreksi terhadap kecepatan angin yang berlebih untuk menjaga kecepatan turbin angin pada pada kondisi presetnya.

Jadi, dari penjelasan ini dapat ditambahkan pada deskripsi fitur yang dimiliki oleh sistem yang diusulkan ini, yaitu:

- Sistem bersifat *self powered*, sehingga tidak memerlukan energi dari luar. Untuk keperluan operasi komponen-komponen elektroniknya diperoleh dari baterai.
- Kontrol hanya bekerja ketika kecepatan angin berlebih saja sehingga sistem kontrol hanya akan bekerja pada waktu-waktu tertentu saja dan ringan.
- Bisa menjadi alternatif pilihan dari sistem-sistem kontrol yang telah ada.

2. METODE PENELITIAN.

Metodologi yang digunakan untuk menyelesaikan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1) Pengadaan *eddy current brake* (ECB) sesuai dengan generator yang digunakan dan sistem kendalinya. Generator yang digunakan adalah generator dari wind generator tipikal (*low speed*) yang digunakan dalam [5].

ECB yang digunakan adalah ECB yang dirancang untuk tegangan nominal 30V, 1A. Sistem kendali yang diterapkan di sini menggunakan pengendali PI.

2) Pengujian laboratorium, meliputi:

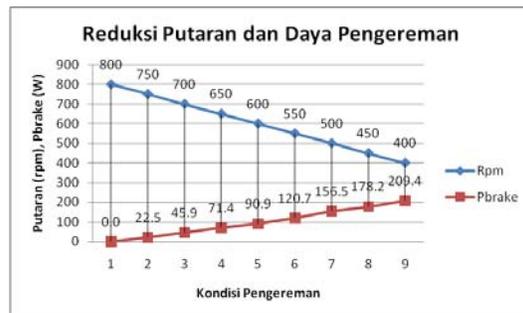
- Pengujian generator untuk mengetahui karakteristik generator meliputi: tegangan, arus dan daya keluaran generator sebagai fungsi kecepatan.
- Pengujian ECB untuk mengetahui korelasi antara arus/tegangan masukan dan daya pengeremannya.
- Uji sistem secara keseluruhan untuk mengetahui performa kontrolnya.

Untuk mensimulasikan daya dan kecepatan turbin angin digunakan motor dc yang kecepatan dan dayanya bisa diatur-aturl sesuai keperluan dengan asumsi bahwa gaya yang bekerja adalah satu arah sehingga momen *yawing* diabaikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Daya Pengereman ECB

Daya pengereman suatu ECB merupakan hal yang terpenting. Dengan diketahuinya daya pengereman ini sama halnya dengan mengetahui kapasitas dari ECB.



Gambar 3 Reduksi putaran sebagai fungsi daya pengereman

Kurva ini memberikan gambaran tentang hubungan antara daya pengereman dan besar putaran yang mampu direduksi. Antara keduanya mempunyai hubungan linier dimana semakin besar putaran yang bisa direduksi semakin besar pula daya pengereman yang dibutuhkan. Dengan pengesetan yang dilakukan dalam pengujian, kecepatan putaran dari 800 rpm direduksi jadi 400 rpm dibutuhkan daya pengereman sebesar 209,4 W. (Selama pengujian tegangan sumber motor dc dibuat konstan).

Jadi, dengan kurva ini dapat ditentukan besar daya pengereman yang diperlukan untuk menurunkan

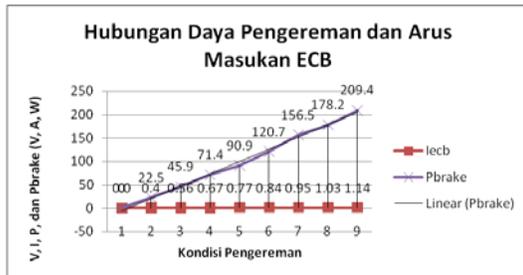
kecepatan putar poros generator. Ini sangat diperlukan untuk mencari korelasinya terhadap arus kemagnetan yang harus diberikan kepada ECB untuk dapat berfungsi seperti yang dikehendaki.

Berikut ini akan dibahas hubungan antara daya pengereman dan arus kemagnetan yang harus diberikan ke ECB.

3.2 Hubungan antara Daya Pengereman dan Arus Masukan ECB

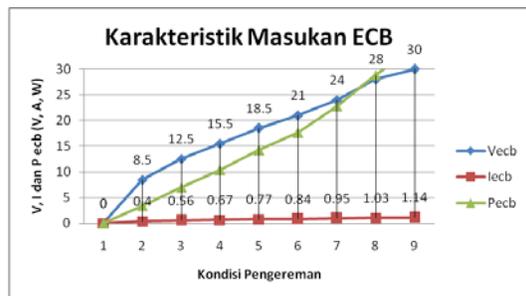
Hubungan antara daya pengereman P_{brake} dan arus I_{ecb} ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan hubungan daya pengereman dan daya masukan ECB ditampilkan pada Gambar 5.

Berdasarkan kurva pada Gambar 4, terlihat bahwa semakin tinggi arus eksitasi ECB semakin tinggi pula daya pengeremannya. Hal ini sesuai dengan konsep bahwa P_{brake} berbanding lurus terhadap fluks magnet, sementara itu fluks magnet yang dibangkitkan adalah berbanding lurus dengan arus eksitasinya ($\Phi \sim I_{eks}$) selama belum terjadi kondisi saturasi. Kurva ini menunjukkan hubungan kedua variabel tersebut adalah linier. Untuk reduksi putaran 800 rpm menjadi 400 rpm dibutuhkan daya pengereman sebesar 209,4 W. Daya pengereman ini memerlukan arus total eksitasi I_{ecb} sebesar 1,14 A.



Gambar 4 Hubungan Daya Pengereman dan Daya Masukan ECB

Lalu, bagaimana hubungan arus eksitasi I_{ecb} dan daya masukan P_{ecb} -nya disajikan pada Gambar 5.

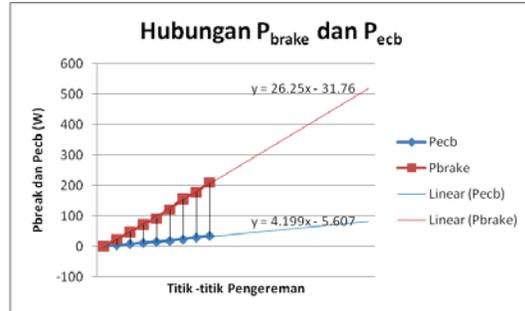


Gambar 5 Karakteristik Masukan ECB

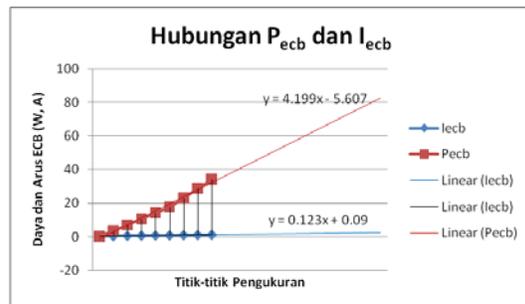
Kurva ini memberikan informasi tentang tegangan, arus dan daya masukan ECB untuk daya pengereman yang berbeda-beda seperti yang disajikan pada Gambar 4. Untuk daya pengereman 22,5 – 209,4 W diperlukan I_{ecb} 0,4 – 1,14 A secara linier.

Gambar 5 menunjukkan bahwa arus I_{ecb} berbanding lurus juga dengan daya P_{ecb} -nya. Dengan demikian bisa

dikorelasikan antara daya pengereman P_{brake} dengan daya masukan P_{ecb} . Hubungan kedua variabel tersebut juga mempunyai hubungan linier (Gambar 6). Informasi tegangan pada Gambar 5 juga sangat penting karena tegangan ini yang harus sesuai dengan tegangan generator, yaitu 30 V.



Gambar 6 Hubungan Daya Pengereman dan Daya Masukan ECB



Gambar 7 Hubungan Daya dan Arus Masukan ECB

Gambar 6 dan 7 di samping menunjukkan gambaran hubungan antara P_{brake} , P_{ecb} dan I_{ecb} , juga memberikan gambaran ekstrapolasinya untuk daya pengereman yang lebih tinggi sampai batas kemampuan generator-nya.

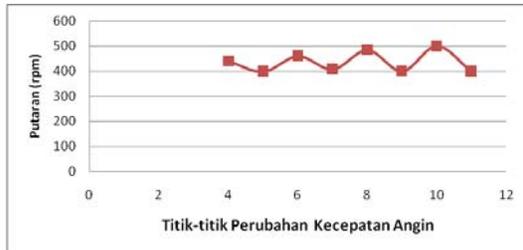
Berdasarkan analisis dari hasil pengujian di atas menunjukkan bahwa daya pengereman berbanding lurus dengan daya masukan ECB. Karena daya masukan ECB berbanding lurus dengan arus eksitasinya, maka dapat dikatakan bahwa daya pengereman ECB berbanding lurus dengan arus eksitasi I_{ecb} . I_{ecb} tersebut dicatu dari tegangan 28-30 V yang sesuai dengan tegangan kerja generator.

3.3 Fungsi Kerja Sistem Kontrol

• Kemampuan Sistem Kontrol dalam mengatasi kecepatan lebih

Setelah semua rangkaian diuji fungsinya masing-masing kemudian dilakukan perakitan secara keseluruhan dan kemudian diuji unjuk kerja sistem kendali secara keseluruhan. Dalam percobaan ini diterapkan bermacam-macam kecepatan angin dari 400 rpm sampai dengan 500 rpm dengan dua macam kondisi kontrol, yaitu: Kontrol Off (tanpa kontrol) dan Kontrol On (kontrol aktif).

Terkait dengan bagaimana kemampuan kontrol dari sistem yang dirancang diperlihatkan pada Gambar 8. Gambar ini menunjukkan dengan putaran yang berubah-ubah, bila kontrolnya aktif, maka putaran tersebut akan dibawa kembali ke harga setpointnya, yang dalam hal ini adalah 400 rpm.

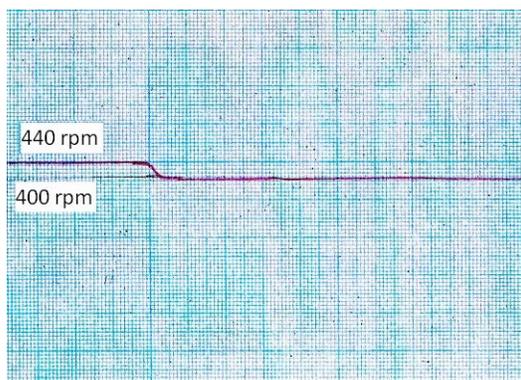


Gambar 8 Kemampuan Sistem dalam mempertahankan kecepatan

Jadi, dari gambar ini jelas terlihat bagaimana kemampuan sistem kontrol dalam mengatasi kecepatan angin di atas kecepatan nominalnya. Dengan kecepatan putaran yang berubah di atas setpoint selalu dibawa ke setpointnya. Ini menunjukkan bahwa sistem kontrol sudah dapat berfungsi dengan baik pada satu aspek tersebut.

• **Kemampuan Sistem Kontrol dalam mengikuti Setpoint**

Setelah mengetahui kemampuan sistem kontrol dalam mengatasi kecepatan lebih, aspek lain yang penting diketahui dari performa dari sistem kontrol adalah kemampuannya dalam mengikuti setpoint. Setpoint merupakan titik kerja yang diharapkan mampu dijaga oleh sistem kontrol walaupun terjadi gangguan-gangguan. Setpoint merupakan daerah yang menjadi pedoman pula dalam melakukan penalaan parameter-parameter kontrolnya.



Gambar 9 Kemampuan Sistem dalam mengikuti Setpoint

Gambar 9 menunjukkan kemampuan sistem kontrol dalam mengikuti setpointnya. Dalam gambar ini menunjukkan bagaimana kecepatan putaran poros generator ketika setpointnya diset pada putaran 440 rpm, keluaran yang dihasilkan juga 440 rpm dan ketika setpoint pada 400 rpm sistem juga

mengikutinya. Ini menunjukkan bahwa sistem kontrol mempunyai kemampuan mengikuti setpointnya dengan baik.

3.4 Kemampuan sistem dalam mengatasi kecepatan angin

Yang tidak kalah pentingnya dalam kajian ini adalah seberapa jauh kemampuan sistem dalam mengatasi kecepatan angin yang berlebih. Generator mempunyai daya keluaran nominal 300 W, daya maksimum 500 W, tegangan 28 V, dan 400 rpm. Perhatikan Gambar 4 dan 5. Untuk membangkitkan daya pengereman 209,4 W diperlukan arus 1,14 A dan tegangan 30 V dc. Di samping itu Gambar 6 dan 7 menunjukkan bahwa P_{brake} berbanding lurus dengan I_{ecb} . Mengambil analogi tersebut bisa diestimasi kemampuan generator dalam mengatasi kecepatan angin yang berlebih.

$P_{brake} = 209,4$ W dengan $P_{ecb} = 1,14 \times 30$ V = 34,2 W. Daya lebih yang dimiliki generator adalah: 500 W - 300 W = 200 W.

Dengan daya 200 W dan hubungan antara kedua daya ini linier, maka dapat dihitung kemampuan pengereman sebesar:

$$(200/34,2 \times 209,4) = 1225$$

Jadi dengan kelebihan daya keluarannya, generator melalui ECB mampu meredam daya akibat kecepatan angin yang berlebih sekitar 4 x daya keluaran generator pada kondisi nominal. Sehingga kecepatan berlebih angin yang bisa diatasi oleh sistem ini sesuai dengan Pers. 2 dan 3:

$$\frac{P_2}{P_1} \approx \frac{V_2^3}{V_1^3}, \text{ atau: } V_2^3 \approx 4V_1^3$$

Dengan demikian:

$$V_2 \approx V_1 \sqrt[3]{4} \approx 1,6V_1$$

Jadi dengan kemampuan lebih generator sebesar 200 W dapat digunakan untuk meredam kecepatan angin 1,6 kali kecepatan maksimum angin ketika turbin bekerja secara nominal.

4. KESIMPULAN.

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan dalam penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Daya pengereman ECB berbanding lurus dengan arus dan daya masukan eksitasi kemagnetannya sehingga untuk mengatur daya pengereman dapat dilakukan dengan mengatur arus eksisasinya. sehingga untuk menaikkan daya pengereman.
- Dengan daya keluaran ekstra generator sebesar 200 W dengan menggunakan ECB ini dapat meredam kecepatan angin berlebih sampai dengan 1,6 kali kecepatan nominalnya.
- Sistem kontrol yang dirancang dapat berfungsi dengan baik. Ini ditunjukkan dari kemampuannya

mengatasi kecepatan putaran berlebih. Sistem kontrol juga memiliki kemampuan dalam mengikuti setpointnya. Sehingga sistem kontrol ini cukup tepat untuk diterapkan.

- Sistem kontrol hanya bekerja hanya ketika kecepatan angin/turbin melampaui harga maksimalnya.
- Daya yang digunakan dalam sistem kontrol ini diambil dari generator itu sendiri, jadi tidak memerlukan daya dari luar. Ini merupakan salah satu kelebihan dari sistem yang diusulkan ini.

4.2 Saran

- Perlu perhitungan lebih lanjut tentang beban tambahan yang ditanggung oleh tower dan poros akibat adanya ECB.
- Sistem ini secara prinsip dapat diterapkan di lapangan, namun secara praktis masih perlu rancangan tentang casing dan kemasannya

DAFTAR PUSTAKA

1. Reksoatmodjo, T.N., 2005, *Vertical-Axis Drag Windmill*, UNJANI.
2. Schmidt, Michael, 2009, *Wind Turbine Design Optimization*, Strategic Energy Institute, Georgia Institute of Technology (www.energy.gatech.edu).
3. Hackleman Michael, 2000, *Electricity from Wind: Wind Energy Potential*, California.
4. Steisdal, Henrik, 1999, *The Wind Turbines Components and Operation*, Bonus Energy A/S, Brabde.
5. Feng Guang Brand, *Operator's Manual for Wind Turbine Generator Model FD2.5-300 WJ*, Inner Mongolia Shangdu Livestock Machinery Factory, Shangdu – China

5. UCAPAN TERIMA KASIH.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Politeknik Negeri Bandung melalui UPPM yang telah mendanai pelaksanaan penelitian ini. Demikian pula dengan Jurusan Teknik Konversi Energi beserta staf pelaksanaan yang telah memfasilitasi dan membantu pelaksanaan penelitian ini. Semoga ini diterima sebagai amal baik kita semua.

