ANALISIS PERFORMA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN DENGAN GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN 2 KW BERPUTARAN RENDAH

Ramadoni Syahputra[1)], Indah Soesanti[2)]

[1]Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,
Jl. Ringroad Barat, Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta 55183
Telepon (0274) 387656
e-Mail : ramadoni@umy.ac.id

[2]Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik,
Universitas Gadjah Mada,
Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta 55281
e-Mail : indsanti@gmail.com

Bandung, 3 - 4 Desember 2015

ABSTRAK

Pemerintah Republik Indonesia melalui Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menargetkan hingga 2025 minimal 23% dari total pasokan energi listrik nasional berasal dari sumber energi terbarukan. Program Pemerintah ini harus didukung oleh seluruh daerah untuk berkontribusi mengembangkan pembangkit listrik energi terbarukan sesuai potensinya masing-masing. Dalam hal ini, wilayah Kabupaten Bantul Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, khususnya kawasan pantai selatan sangat berpotensi dikembangkan pembangkit listrik tenaga angin (PLTAngin). Dalam riset ini dilakukan rancang-bangun dan uji-coba PLTAngin berkapasitas maksimum 2 kW. Pengujian dilakukan pada tanggal 5 dan 6 September 2015 di Pantai Baru, Kecamatan Srandakan, Kabupaten Bantul. Hasil pengujian pada 5 September 2015 diperoleh bahwa daya generator tertinggi terjadi pukul 12.40 WIB yaitu sebesar 768,96 watt, dengan laju angin 8,76 m/s. Tegangan AC generator sebesar 40,00 volt, tegangan DC generator setelah disearahkan menjadi 53,40 volt, dan arus beban adalah 14,40 ampere. Pada kondisi ini PLTAngin 2 kW hasil rancang-bangun mempunyai efisiensi generator sebesar 38,4%. Selanjutnya hasil pengujian tanggal 6 September 2015 diperoleh bahwa daya generator tertinggi terjadi pukul 10.50 WIB yaitu sebesar 842,20 watt, dengan laju angin 9,53 m/s. Pada kondisi puncak ini dihasilkan tegangan AC generator sebesar 39,00 volt, tegangan DC generator setelah disearahkan menjadi 49,60 volt, dan arus beban adalah 17,00 ampere, sehingga menghasilkan efisiensi generator sebesar 42,1%. Hasil riset ini menunjukkan bahwa PLTAngin merupakan solusi alternatif di wilayah pantai selatan Bantul DIY untuk penyediaan sumber energi terbarukan.

Kata Kunci : pembangkit listrik tenaga angin, energi terbarukan, generator sinkron, putaran rendah, analisis performa.

I. PENDAHULUAN

Pemerintah Republik Indonesia melalui Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) telah mencanangkan target bahwa hingga tahun 2025 minimal 23% dari total pasokan energi listrik harus berasal dari sumber energi terbarukan [1]–[3]. Target ini sangat realistis karena semakin terbatasnya sumber energi konvensional yang mengandalkan bahan bakar minyak dan batubara. Selain itu masalah lingkungan yaitu polusi udara yang ditimbulkan oleh sumber energi listrik konvensional tersebut. Salah satu sumber energi listrik terbarukan yang sangat potensial di Negara Indonesia adalah tenaga angin. Di antara daerah yang potensial untuk membangkitkan energi listrik dari tenaga angin adalah wilayah pesisir pantai selatan pulau Jawa, khususnya daerah kabupaten Bantul, DI Yogyakarta, yang mempunyai kecepatan angin berkisar 3–12 m/s [4]–[6].

Dengan mengambil pelajaran dari negara-negara di benua Eropa, pembangkit listrik tenaga angin merupakan pembangkit listrik energi terbarukan yang paling cepat pertumbuhannya [7]–[9]. Telah banyak pembangkit listrik tenaga angin yang dibangun dengan kapasitas terpasang mulai dari beberapa kilowatt hingga berkapasitas megawatt yang terinterkoneksi dengan jaringan distribusi daya listrik. Sebagai contoh, Enercon telah membangun turbin angin berkapasitas 4,5 MW dengan diameter rotor 112,8 m. Aplikasi pembangkit listrik tenaga angin skala besar biasanya menggunakan *doubly-fed induction generator* (DFIG) [10]–[11] dengan pengendalian blade pitch angle guna menghasilkan daya listrik yang optimal [12]–[13]. Kedua teknologi tersebut secara terpisah telah dicoba dalam beberapa riset di Eropa namun dalam kapasitas daya besar dalam satuan mega watt sesuai dengan kondisi di Eropa yang mempunyai kecepatan angin yang lebih tinggi dan relatif stabil (10–15 m/s) [14]. Sementara itu untuk kapasitas kecil hingga menengah, PLTAngin sangat efisien menggunakan generator sinkron [15]. Generator jenis ini sangat sesuai dengan kondisi geografis Indonesia khususnya wilayah Bantul bagian selatan yang menjadi lokasi uji-coba riset ini. Oleh karenanya sangat menarik untuk merancang-bangun PLTAngin sesuai kondisi angin di Indonesia khususnya wilayah Bantul selatan.

Riset ini diharapkan berkontribusi dalam memperkuat Sistem Inovasi Nasional (SINAS) guna mewujudkan kemandirian energi dan kegiatan ekonomi utama dalam MP3EI. Riset ini juga membantu mewujudkan program pemerintah dalam menyediakan pembangkit listrik yang berasal dari sumber energi terbarukan serta membantu menjaga kelestarian lingkungan.

II. PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

Dewasa ini telah banyak dilakukan pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga angin baik (PLTAngin) dalam hal peningkatan kapasitas pembangkitan energi listriknya hingga peningkatan efisiensi sistemnya. Produksi energi listrik dari sumber energi angin pertama sekali dilakukan oleh Charles Brush di Cleveland, Ohio, Amerika Serikat pada tahun 1887 [12]. Dalam hal ini digunakan generator DC untuk menghasilkan daya listrik dan dirancang untuk mengisi baterai. Sedangkan generator induksi pertama sekali digunakan sebagai bagian dari pembangkit listrik tenaga angin adalah pada tahun 1951.

Turbin angin mengubah energi kinetik yang berasal dari angin menjadi energi mekanik berupa putaran kincir angin. Energi kinetic ini tergantung pada kerapatan udara dan kecepatan angin. Oleh karena itu, daya yang dihasilkan oleh turbin angin diberikan oleh persamaan berikut [16]–[17].

$$P = 0{,}5\, C_p \rho A V^3 \qquad (1)$$

dengan C_p adalah koefisien daya, ρ adalah kerapatan angin dalam kg/m^3, A adalah luas sudu turbin dalam m^2, dan V adalah kecepatan angin dalam m/s. Rasio kecepatan ujung kincir angin adalah perbandingan laju linear sudu turbin dan laju angin, sesuai persamaan berikut:

$$\lambda = R\omega / v \qquad (2)$$

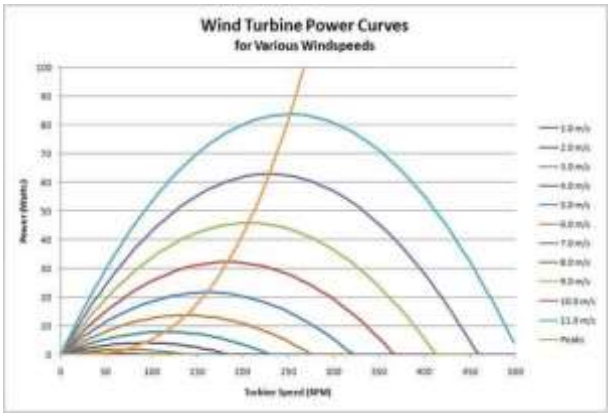
Substitusi persamaan (2) ke dalam persamaan (1), diperoleh:

$$P = 0{,}5\, C_p(\lambda) \rho A (R/\lambda)^3 (\omega)^3 \qquad (3)$$

Selanjutnya daya keluaran turbin angin dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P = 0{,}5\, \rho A\, C_p\, (v/\lambda) \qquad (4)$$

dengan R adalah jari-jari rotor turbin dalam meter.

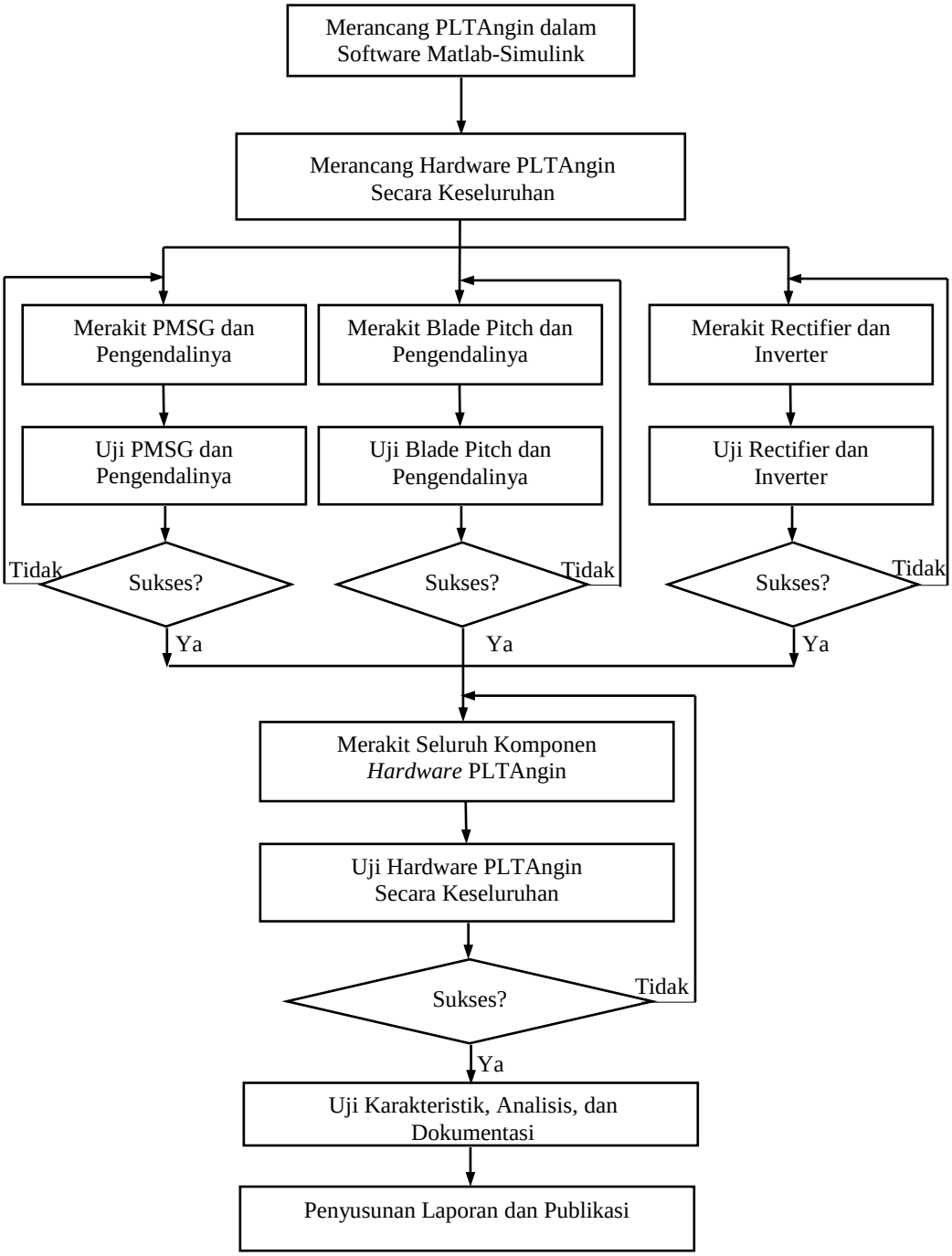


Gambar 1. Grafik karakteristik turbin angin [9].

Gambar 1 menunjukkan bagaimana operasi laju turbin yang bervariasi akan menghasilkan daya listrik yang berasal dari angin. Daya maksimum mengikuti relasi kubik satuan. Untuk pembangkitan laju variabel, maka digunakan generator induksi karena mempunyai karakteristik kecepatan rotor yang fleksibel, sedangkan generator sinkron mempunyai kecepatan yang konstan. Dalam riset ini, kecepatan rotor pada kondisi subsinkron untuk laju angin kurang dari 10 m/s dan kondisi supersinkron untuk laju angin lebih dari 10 m/s.

III. METODE

Tahapan dan alur kegiatan riset ini ditunjukkan pada Gambar 2. Pada Gambar tersebut terlihat bahwa kegiatan riset diawali dengan merancang pembangkit listrik tenaga angin dalam perangkat lunak Matlab-simulink. Setelah diperoleh model yang valid dalam perangkat lunak Matlab-simulink, maka dilanjutkan dengan merancang-bangun pembangkit listrik tenaga angin dalam bentuk perangkat-keras. Komponen utama perangkat-keras pembangkit listrik tenaga angin terdiri dari generator sinkron magnet permanen (*permanent magnet synchoronous generator,* PMSG) beserta pengendalinya, bilah turbin (*blade*), rangkaian penyearah (*rectifier*) dan inverter.



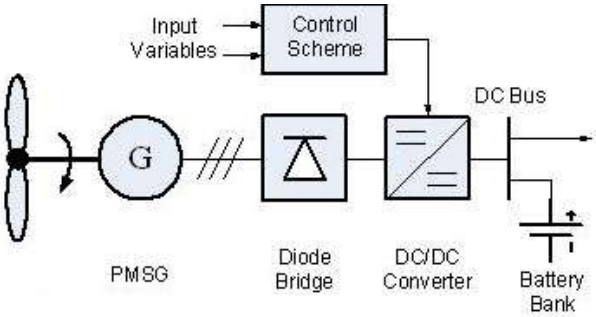
Gambar 2. Tahapan dan alur kegiatan riset rancang bangun PLTAngin.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam riset ini telah dirancang-bangun pembangkit listrik tenaga angin (PLTAngin) berkapasitas maksimum 2 kW dengan bentuk *blade* jenis horizontal, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Generator yang digunakan adalah jenis generator sinkron magnet permanen 3 phase. Spesifikasi generator sinkron magnet permanen yang digunakan pada PLTAngin yang dibuat adalah sebagai berikut:

Daya maksimum	: 1000 watt
Putaran nominal	: 400 rpm
Arus nominal	: 18,8 ampere

Gambar 3. PLTAngin berkapasitas 2 kW dengan generator sinkron magnet permanen



Gambar 4. Diagram rangkaian PLTAngin berkapasitas 2 kW dengan generator sinkron magnet permanen

Pembangkit listrik tenaga angin hasil rancang bangun ini selanjutnya dilakukan uji-coba untuk mengetahui performanya. Pengujian dilaksanakan pada tanggal 5 dan 6 September 2015 berlokasi di Pantai Baru, Kecamatan Srandakan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Pada saat uji-coba berlangsung, cuaca di lokasi Pantai Baru sangat cerah dengan suhu udara berkisar 30°C. Grafik laju angin di Pantai Baru pada tanggal 5 September 2015 ditunjukkan pada Gambar 5, sedang grafik laju angin tanggal 6 September 2015 ditunjukkan pada Gambar 6.

Gambar 5. Grafik laju angin di lokasi uji-coba PLTAngin, Pantai Baru, tanggal 5 September 2015

Gambar 6. Grafik laju angin di lokasi uji-coba PLTAngin, Pantai Baru, tanggal 6 September 2015

Pada tanggal 5 September 2015, uji-coba PLTAngin dilakukan pada pukul 12.00 WIB sampai dengan pukul 17.00 WIB. Berdasarkan grafik laju angin pada Gambar 5 terlihat bahwa laju angin tertinggi pada tanggal 5 September 2015 adalah 8,76 m/s yang terjadi pada pukul 12.10, 12.30, dan 12.40 WIB, sedang laju angin terendah

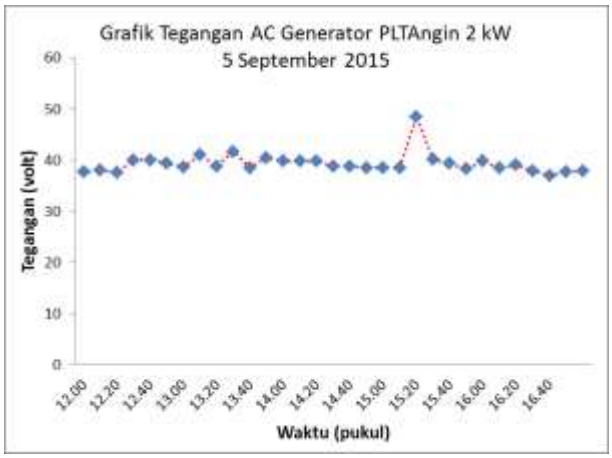
sebesar 5,71 m/s yang terjadi pada pukul 16.40, 16.50, dan 17.00 WIB.

Selanjutnya pada tanggal 6 September 2015, uji-coba PLTAngin dilakukan pada pukul 10.20 WIB sampai dengan pukul 12.30 WIB. Berdasarkan grafik laju angin pada Gambar 6 terlihat bahwa laju angin tertinggi pada tanggal 6 September 2015 adalah 9,53 m/s yang terjadi pada pukul 10.30, 10.50, 11.10, 11.30, dan 11.40 WIB, sedang laju angin terendah sebesar 8,00 m/s yang terjadi pada pukul 10.20, 10.40, 12.20, dan 12.30 WIB.

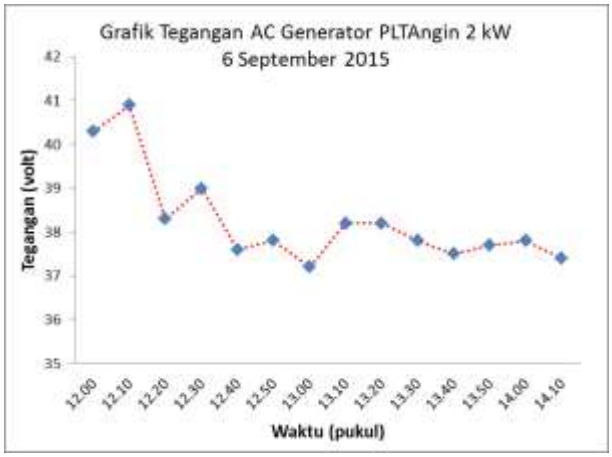
Berdasarkan grafik pada Gambar 7 terlihat bahwa tegangan keluaran generator relatif stabil berada pada rentang 37,70 volt sampai dengan 48,51 volt pada variasi laju angin 5,71 m/s hingga 8,76 m/s. Pada Gambar 8 juga terlihat bahwa tegangan keluaran generator masih stabil yang berkisar 37,40 volt sampai dengan 40,90 volt pada laju angin berkisar 8,00 m/s hingga 9,53 m/s.

Tegangan AC keluaran generator selanjutnya disearahkan menggunakan *rectifier* 3 phase untuk menghasilkan tegangan arus searah (DC) nominal 48 volt. Tegangan DC hasil penyearahan oleh *rectifier* yang diamati tanggal 5 dan 6 September 2015 ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.

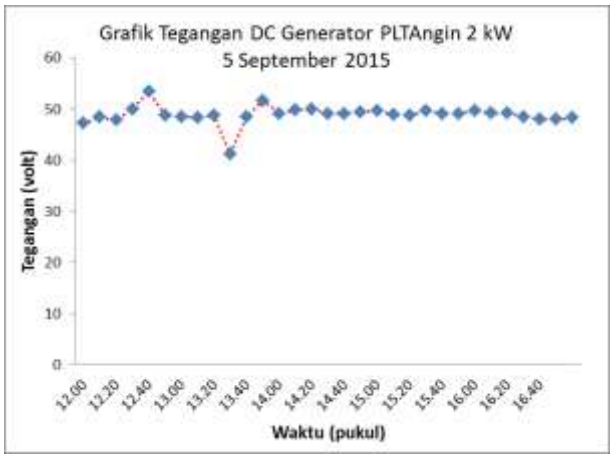
Berdasarkan grafik pada Gambar 9 terlihat bahwa tegangan keluaran *rectifier* relatif stabil berada pada rentang 47,80 volt sampai dengan 53,40 volt pada variasi laju angin 5,71 m/s hingga 8,76 m/s. Pada Gambar 10 juga terlihat bahwa tegangan keluaran *rectifier* masih stabil yang berkisar 48,00 volt sampai dengan 53,00 volt pada laju angin berkisar 8,00 m/s hingga 9,53 m/s. Tegangan keluaran *rectifier* ini sesuai dengan yang diharapkan yaitu berada pada kisaran 48 volt sesuai dengan nominal tegangan baterai yang akan digunakan sebagai penyimpan energi listring dari PLTAngin hasil rancang-bangun.



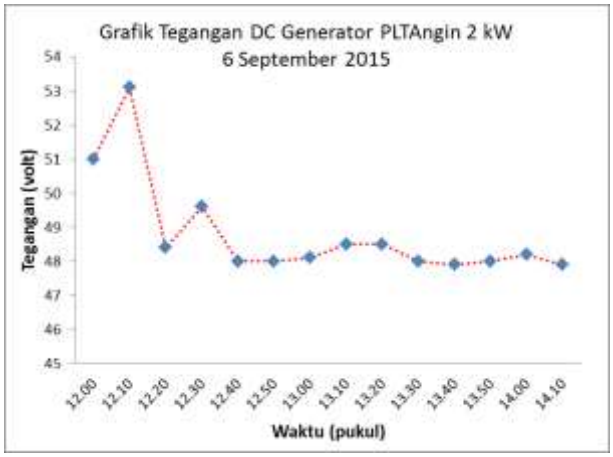
Gambar 7. Grafik hasil pegukuran tegangan AC generator pada tanggal 5 September 2015



Gambar 8. Grafik hasil pegukuran tegangan AC generator pada tanggal 6 September 2015



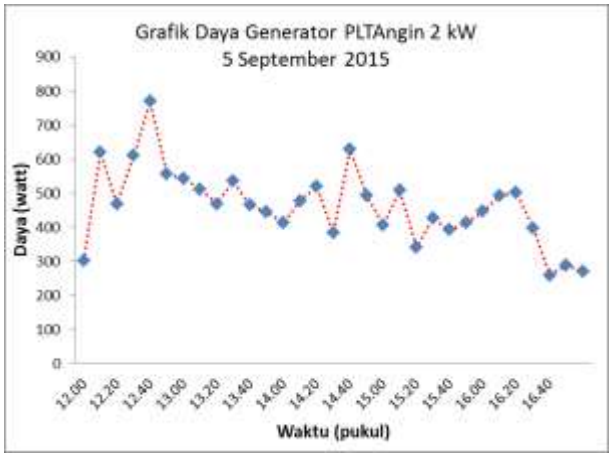
Gambar 9. Grafik hasil pegukuran tegangan DC *rectifier* pada tanggal 5 September 2015



Gambar 10. Grafik hasil pegukuran tegangan DC *rectifier* pada tanggal 9 September 2015

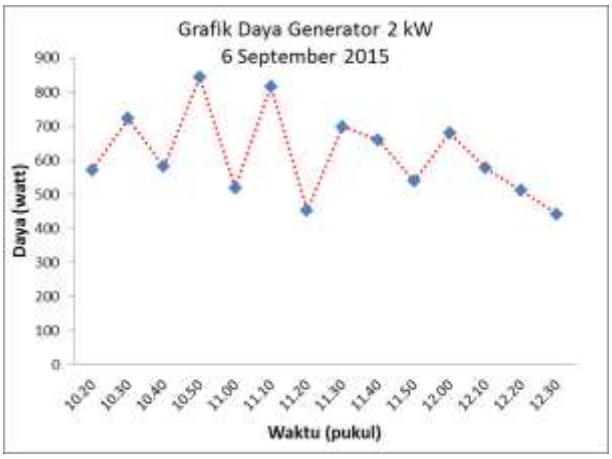
Energi listrik PLTAngin selanjutnya disimpan dalam baterai 12 volt yang diseri sebanyak 4 baterai sehingga menghasilkan tegangan ekivalen 48 volt. Dalam riset ini dilakukan pengamatan arus pemuatan baterai sehingga diperoleh besarnya daya listrik yang tersimpan dalam baterai dalam kurun waktu selama pengujian. Dengan demikian baterai berfungsi seolah-olah sebagai beban yang menyerap energi listrik, sehingga dapat diamati besar daya dan efisiensi pembangkit listrik tenaga angin hasil rancang-bangun.

Data-data daya listrik PLTAngin hasil pengujian tanggal 5 September 2015 ditunjukkan pada Gambar 11, sedang hasil pengujian tanggal 6 September 2015 ditunjukkan pada Gambar 12. Berdasarkan Gambar 11 terlihat bahwa pada pengujian PLTAngin pada tanggal 5 September 2015 di Pantai Baru, Bantul, daya generator pada pukul 12.40 WIB dihasilkan nilai tertinggi yaitu sebesar 768,96 watt. Hal ini disebabkan pada saat itu laju angin relatif tinggi yaitu 8,76 m/s. Pada kondisi puncak ini dihasilkan tegangan AC generator (phasa ke phasa) sebesar 40,00 volt, tegangan DC generator setelah disearahkan menjadi 53,40 volt, dan arus beban yang mengisi baterai adalah 14,40 ampere. Pada kondisi ini PLTAngin 2 kW hasil rancang-bangun mempunyai efisiensi generator sebesar 38,4%.



Gambar 11. Grafik hubungan daya yang dihasilkan PLTAngin 2 kW terhadap waktu pengujian pada tanggal 5 September 2015 di Pantai Baru, Bantul

Selanjutnya hasil pengujian PLTAngin 2 kW dengan pembebanan baterai 48 V pada tanggal 6 September 2015 di Pantai Baru, Bantul ditunjukkan pada Gambar 12. Berdasarkan Gambar tersebut terlihat bahwa pada pengujian wind turbine 2 kW pada tanggal 6 September 2015 di Pantai Baru, Bantul, daya generator tertinggi dihasilkan pada pukul 10.50 WIB yaitu sebesar 842,20 watt. Hal ini disebabkan pada saat itu laju angin relatif tinggi yaitu 9,53 m/s. Pada kondisi puncak ini dihasilkan tegangan AC generator (phasa ke phasa) sebesar 39,00 volt, tegangan DC generator setelah disearahkan menjadi 49,60 volt, dan arus beban yang mengisi baterai adalah 17,00 ampere. Pada kondisi ini PLTAngin 2 kW hasil rancang-bangun mempunyai efisiensi generator sebesar 42,1%.



Gambar 12. Grafik hubungan daya yang dihasilkan PLTAngin 2 kW terhadap waktu pengujian pada tanggal 6 September 2015 di Pantai Baru, Bantul

Dari keseluruhan hasil uji pada pembangkit listrik tenaga angin 2 kW yang dirancang-bangun dapat dilihat bahwa pembangkit listrik ini masih dapat ditingkatkan efisiensinya menjadi lebih tinggi dari 42,1% jika angin yang menerpa turbin angin memiliki laju yang lebih tinggi dari 9,53 m/s. Hasil observasi menunjukkan bahwa laju angin di wilayah pantai selatan Bantul dapat mencapai 12,3 m/s [4].

V. KESIMPULAN

Dalam riset ini telah dirancang-bangun dan diuji-coba pembangkit listrik tenaga angin (PLTAngin) berkapasitas maksimum 2 kW. Pengujian dilakukan pada tanggal 5 dan 6 September 2015 di Pantai Baru, kecamatan Srandakan, kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Hasil pengujian pada tanggal 5 September 2015 diperoleh bahwa daya generator tertinggi terjadi pukul 12.40 WIB yaitu sebesar 768,96 watt, dengan laju angin yaitu 8,76 m/s. Pada kondisi puncak ini dihasilkan tegangan AC generator sebesar 40,00 volt, tegangan DC generator setelah disearahkan menjadi 53,40 volt, dan arus beban yang mengisi baterai adalah 14,40 ampere. Pada

kondisi ini PLTAngin 2 kW hasil rancang-bangun mempunyai efisiensi generator sebesar 38,4%. Selanjutnya hasil pengujian pada tanggal 6 September 2015 diperoleh bahwa daya generator tertinggi terjadi pukul 10.50 WIB yaitu sebesar 842,20 watt, dengan laju angin yaitu 9,53 m/s. Pada kondisi puncak ini dihasilkan tegangan AC generator sebesar 39,00 volt, tegangan DC generator setelah disearahkan menjadi 49,60 volt, dan arus beban yang mengisi baterai adalah 17,00 ampere. Pada kondisi ini PLTAngin 2 kW hasil rancang-bangun mempunyai efisiensi generator sebesar 42,1%. Hasil riset ini menunjukkan bahwa PLTAngin merupakan solusi alternatif di wilayah pantai selatan Bantul DIY untuk penyediaan sumber energi terbarukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi atas dukungan pendanaan melalui skema INSINAS kategori Riset Terapan tahun 2015, sehingga riset ini dapat terlaksana dengan baik. Semoga kerjasama yang baik ini dapat berlanjut terus sehingga dapat berkontribusi dalam pengembangan riset dan penguatan sistem inovasi nasional.

DAFTAR PUSTAKA

[1] D. Kusdiana, "Kondisi Riil Kebutuhan Energi di Indonesia dan Sumber-Sumber Energi Alternatif Terbarukan", *Presented at the Seminar of Renewable Energy, Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral*, Bogor, 3 Dec. 2011.

[2] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, "Reconfiguration of Distribution Network with DG Using Fuzzy Multi-objective Method", *Int. Conference on Innovation, Management and Technology Research (ICIMTR)*, May 21-22, 2012, Melacca, Malaysia.

[3] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, "Optimization of Distribution Network Configuration with Integration of Distributed Energy Resources Using Extended Fuzzy Multi-objective Method", *International Review of Electrical Engineering (IREE), vol. 9, no. 3*, 2014.

[4] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, "Performance Improvement of Radial Distribution Network with Distributed Generation Integration Using Extended Particle Swarm Optimization Algorithm", *International Review of Electrical Engineering (IREE), vol. 10, no. 2*, 2015. pp. 293-304.

[5] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, "Optimal Distribution Network Reconfiguration with Penetration of Distributed Energy Resources", in *Proceeding of ICITACEE 2014*, Semarang, Indonesia, November 2014.

[6] R. Syahputra, "Fuzzy Multi-Objective Approach for the Improvement of Distribution Network Efficiency by Considering DG", *IJCSIT, Vol. 4, No. 2*, April 2012, pp. 57-68.

[7] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, "PSO Based Multi-objective Optimization for Reconfiguration of Radial Distribution Network", *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), vol.10, no.6, 2015*. pp. 14573-14586.

[8] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, "Distribution Network Efficiency Improvement Based on Fuzzy Multi-objective Method". *IPTEK Journal of Proceedings Series*. 2014; 1(1): pp. 224-229.

[9] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, "Performance Analysis of Wind Turbine as a Distributed Generation Unit in Distribution System", International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT) Vol 6, No 3, pp. 39-56, June 2014.

[10] Y. Lei, A.Mullane, G.Lightbody, and R.Yacamini, "Modeling of the Wind Turbine With a Doubly Fed Induction Generator for Grid Integration Studies," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21(1), pp.257-264, 2006.

[11] H. Li and Z. Chen, "Overview of generator topologies for wind turbines," *IET Proc. Renewable Power Generation*, vol. 2, no. 2, pp. 123–138, Jun. 2008.

[12] R. Syahputra, I. Robandi, M. Ashari, "Modeling and Simulation of Wind Energy Conversion System in Distributed Generation Units", *3rd International Seminar on Applied Technology, Science and Arts (APTECS)*, 2011, pp. 290-296.

[13] R. Syahputra, "Distributed Generation: State of the arts dalam Penyediaan Energi Listrik", *Penerbit LP3M-UMY Yogyakarta*, Juni 2012.

[14] B.C. Babu and K.B. Mohanty, "Doubly-Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems - Modeling & Simulation", *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 1793-8163, February, 2010.

[15] M.A. Poller, "Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms*", Power Tech Conference Proceedings of 2003 IEEE Bologna*, Vol.3, 6 pp. 23-26 June 2003.

[16] T. T. Chuong, "Voltage Stability Investigation of Grid Connected Wind Farm", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 42, pp. 532-536, 2008.

[17] S. Müller, M. Deicke, and R.W. De Doncker, "Doubly-Fed Induction Generator for Wind Trubines", *IEEE Industry Applications Magazine*, May/June 2002.