

Desain Turbin Angin 1500 Watt dengan MPPT Berbasis Algoritma *Perturb* dan *Observe* untuk Mengoptimalkan Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Dedi Nugroho¹, Sukarno Budi Utomo², dan Agus Suprajitno³
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung
Jl. Raya Kaligawe km.04, Semarang 50112
e-mail : dedi.nugroho@unissula.ac.id

Abstrak— Turbin angin adalah pembangkit listrik yang mengubah energi angin menjadi energi listrik. Keuntungan turbin angin adalah ketersediaan energi angin yang melimpah di alam secara gratis, *renewable energy*, dan bebas polusi, namun ada beberapa kekurangan diantaranya efisiensi turbin rendah dan daya yang dihasilkan bergantung pada perubahan kecepatan, oleh karena itu turbin angin umumnya tidak berdiri sendiri melainkan digabungkan dengan pembangkit listrik lain (*hybrid*) atau ke sistem grid. Efisiensi turbin angin yang rendah disebabkan oleh nilai koefisien daya turbin yang tidak dapat melebihi 0,593, bahkan pada prakteknya hanya sekitar antara 0,3 sampai dengan 0,45. Koefisien ini tergantung dari nilai *tip speed ratio* (TSR) dan *pitch angle* bilah rotor turbin. Berdasarkan hal tersebut maka riset ini bertujuan untuk mendesain turbin angin 1500 watt dengan memperhitungkan nilai TSR yang optimal dan dilengkapi dengan MPPT berbasis algoritma *perturb and observe* (*P and O*) untuk memaksimalkan daya keluaran turbin angin. Metode riset didasarkan pada pemodelan turbin angin dengan menggunakan simulink matlab. Hasil riset berupa rancangan turbin angin 1500 watt, dengan TSR optimal 8,1, koefisien daya 0,48, radius bilah 1,878 meter, diameter rotor turbin 3,755 meter, luas sapuan 11,07 m² dengan kecepatan sudut angular rotor pada kecepatan nominal 34,5 rad/detik. Keluaran turbin angin dengan MPPT menghasilkan tegangan output 91,37 volt, arus output 16,61 ampere dan daya output mencapai 1517 watt pada kecepatan nominal.

Kata Kunci : Turbin angin, tip speed ratio, MPPT

Abstrak - Wind turbines are wind power plants that convert wind energy into electrical energy. The advantage of wind turbines is the availability of wind energy that is abundant in nature for free, renewable energy, and pollution-free, but there are several disadvantages including low turbine efficiency and the power generated depending on changes in wind speed. Low turbine efficiency is caused by the turbine power coefficient value which cannot exceed 0.593, even in practice it is only between 0.3 to 0.45. This coefficient depends on the value of the tip speed ratio (TSR) and the pitch angle of the turbine rotor blades. This research aims to design a 1500 watt wind turbine by calculating the optimal TSR value so that the power coefficient reaches the maximum value, thus the wind turbine design results can produce maximum power. To increase the turbine power, the design is equipped with Maximum Power Point Tracking (MPPT) based on the Perturb and Observe (P and O) algorithm. The research method is based on wind turbine modeling using Simulink Matlab. The result is a design of a 1500 watt wind turbine, with an optimal TSR of 8.1, a power coefficient of 0.48, a blade radius of 1.878 meters, a diameter of the turbine rotor 3.755 meters, an area of 11.07 m² of wind sweep with an angular rotor speed at a nominal wind speed of 34.5 rad / sec. The output of this wind turbine with MPPT produces an output voltage of 91.37 volts, an output current of 16.61 ampere and an output power of 1517 watt at nominal wind speed.

Keywords: Wind turbine, tip speed ratio, MPPT

I. PENDAHULUAN

Turbin angin merupakan pembangkit listrik yang mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik. Proses konversi energi turbin angin pada prinsipnya cukup sederhana yaitu angin yang bergerak dengan kecepatan tertentu akan menerpa bilah rotor turbin, akibatnya rotor turbin akan memperoleh gaya untuk memutar rotor turbin tersebut. Dalam proses ini energi kinetik angin diubah menjadi energi mekanik rotasi, selanjutnya turbin angin akan memutar generator untuk menghasilkan energi listrik.

Meskipun terkesan sederhana namun turbin angin memiliki sejumlah kendala yang mengakibatkan turbin angin memiliki efisiensi turbin yang rendah

Salah satu permasalahan adalah masalah *tip speed ratio* (TSR) yang secara signifikan mempengaruhi besarnya daya yang dapat ditangkap dan diubah menjadi energi mekanik rotasi oleh turbin angin. Desain turbin angin bergantung pada beberapa faktor seperti koefisien daya, jumlah dan ukuran bilah, dan TSR. Untuk menghasilkan daya listrik yang maksimal maka perlu diketahui nilai TSR yang

optimal [11] dengan demikian agar perancangan turbin angin menjadi optimal maka desain bilah (*blade*) rotor turbin perlu dirancang berdasarkan nilai TSR optimal [6].

Disamping perancangan turbin angin yang optimal, teknologi berbasis *power electronic* juga diterapkan untuk memaksimalkan perolehan daya turbin angin yaitu dengan teknologi MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) telah pula diterapkan untuk mengoptimalkan pembangkit listrik tenaga angin. Terdapat beberapa metode MPPT diantaranya *TSR (Tip Speed Ratio) control*, *PSF (Power Signal Feedback) control*, *OT (Optimal Torque) control* dan *P and O control (Perturbation and Observation)* [1]. Sejumlah peneliti telah melakukan riset dan kajian terhadap aplikasi MPPT ini terhadap turbin angin baik dalam bentuk pemodelan dan simulasi ataupun perancangan *prototype*. Beberapa metode aplikasi MPPT tersebut diantaranya aplikasi metode *Perturb and Observasion* pada MPPT melalui pemodelan menggunakan Matlab [3] dan *Proteus* (10), desain pemodelan dan simulasi *proportional integral controller* pada rangkaian *boost converter* MPPT [7], pemodelan rangkaian *buck-boost converter* MPPT melalui *software* Matlab [8], optimalisasi turbin angin sumbu horizontal dengan MPPT [12], algoritma *new adaptive control* pada MPPT [5]. Bebeapa penelitian lain yang berkaitan dengan optimalisasi ini adalah aplikasi *buck conveter* [9] dan kendali *Proportional Integral* untuk pengendalian turbin [4] dan aplikasi empat sumbu horizontal untuk meningkatkan daya turbin angin [2].

II. STUDI PUSTAKA

Daya Angin

Daya angin merupakan daya yang masuk ke area sapuan rotor, yang mana daya tersebut bergantung pada luas sapuan bilah rotor dan kecepatan angin. Daya yang masuk ke luas sapuan turbin dinyatakan dalam persamaan :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (1)$$

Daya tersebut tidak seluruhnya dapat dikonversikan menjadi energi mekanik, karena dipengaruhi oleh koefisien daya C_p yang nilainya secara signifikan bergantung kepada *tip speed ratio (TSR)* dan *blade pitch angle*.

Daya Mekanik Rotasi

Daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin adalah sebagai berikut :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho AV^3 \quad (2)$$

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3 \quad (3)$$

Dengan :

ρ = kerapatan udara (kg/m³)

V = kecepatan (meter/detik)

A = luas sapuan rotor turbin (m²)

R = radius rotor (m)

C_p = koefisien daya turbin

λ = *tip speed ratio (TSR)*

β = *blade pitch angle* (derajat)

TSR adalah perbandingan antara kecepatan angular ujung blade ω_m (rad/detik) dengan kecepatan angin V (meter/detik).

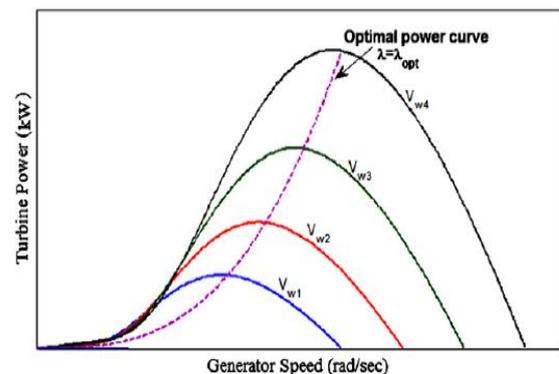
$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V} \quad (4)$$

$$V = \frac{\omega_m R}{\lambda} \quad (5)$$

Jika disubstitusikan pers.(5) ke pers.(3) maka :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_m^3}{\lambda^3} C_p \quad (6)$$

Berdasarkan persamaan tersebut terlihat jelas bahwa daya mekanik turbin tergantung kepada kecepatan angin dan kecepatan sudut angular bilah. Karena poros turbin dikopel dengan generator maka daya mekanik turbin berhubungan pula dengan kecepatan putaran generator. Hubungan antara daya mekanik turbin, kecepatan dan generator dilukiskan dalam grafik karakteristik gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. karakteristik kecepatan generator vs daya turbin

Berdasarkan grafik diatas maka nilai TSR optimal adalah $\lambda = \lambda_{opt}$, sehingga nilai koefisien daya $C_p = C_{pmax}$, dengan demikian daya mekanik optimal adalah :

$$P_{m(opt)} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_m^3}{\lambda_{opt}^3} C_{pmax} = K_{p(opt)} \omega_m^3 \quad (7)$$

Torsi maksimum adalah :

$$T_{m(opt)} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_m^2}{\lambda_{opt}^3} C_{pmax} K_{p(opt)} \omega_m^2 \quad (8)$$

Berdasarkan persamaan diatas maka terlihat bahwa daya optimal turbin diperoleh saat nilai TSR optimal yaitu λ_{opt} . Keadaan ini memungkinkan jika dilakukan pengendalian kecepatan perputaran turbin sehingga dapat bekerja pada kecepatan optimalnya.

Koefisien daya C_p merupakan fungsi dari TSR dan *pitch angle* dan dapat dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-c_5/\lambda_i} + C_6 \lambda \quad (9)$$

dengan :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (10)$$

$C_1 - C_6$ = koefisien empiris
 $C_1 = 0,5176, C_2 = 116, C_3 = 0,4, C_4 = 5, C_5 = 21,$
 Dan $C_6 = 0,0068$

Daya Listrik Turbin

Daya mekanik yang dihasilkan dari rotor turbin digunakan untuk memutar generator listrik sehingga diperoleh daya listrik. Ada beberapa jenis generator yang digunakan pada turbin angin seperti generator sinkron, generator dc, dan generator magnet permanen (PMSG). Besarnya daya listrik dari turbin tergantung pada efisiensi generator dan efisiensi gearbox.

Jika rotor turbin dikopel langsung maka daya keluar generator adalah :

$$P_e = \eta_g P_m \tag{11}$$

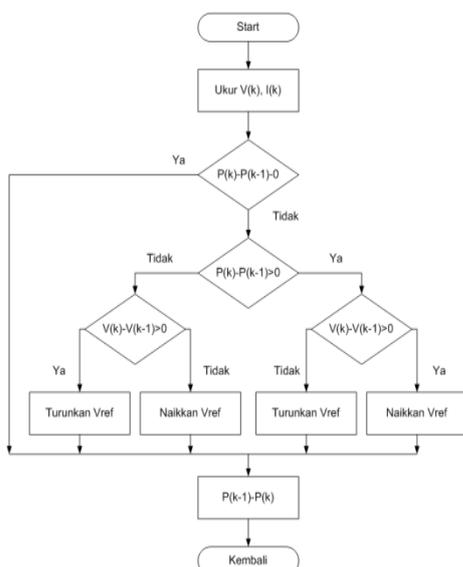
Jika dikopel melalui gearbox maka daya keluar generator menjadi :

$$P_e = \eta_g \eta_{gear} P_m \tag{12}$$

Dengan : η_g = efisiensi generator
 η_{gear} = efisiensi gearbox

Maximum Power Point Tracker (MPPT)

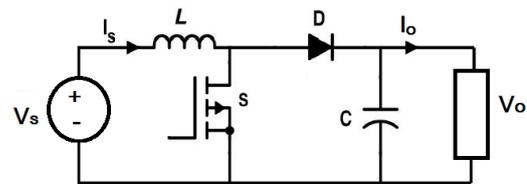
Kelurgan turbin angin adalah daya yang dihasilkan akan mengalami naik dan turun sesuai dengan perubahan kecepatan angin, oleh sebab itu untuk meningkatkan daya keluaran turbin angin maka digunakan sistem MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) yang pada intinya berupa suatu algoritma untuk melacak titik maksimum daya yang akan digunakan untuk pengendalian turbin . Ada sejumlah metode yang digunakan oleh MPPT, salah satunya yang umum dipakai adalah *Perturb and Observe (P and O)*, karena metode ini lebih sederhana yaitu hanya memerlukan pengukuran tegangan dan arus keluaran turbin angin. Alur metode tersebut diperlihatkan dalam flowchart pada gambar 2.



Gambar 2. flowchart Algoritma *P and O*

Boost Converter

Boost converter merupakan perangkat *converter* yang digunakan untuk mengatur pengisian daya listrik ke batere, yang mana perangkat ini dikendalikan oleh MPPT. Pada dasarnya rangkaian *boost converter* berfungsi untuk mengubah daya listrik arus searah tegangan rendah menjadi daya listrik arus searah tegangan tinggi. *Boost converter* digunakan untuk mengatur tegangan yang masuk ke batere agar tidak mengalami kerusakan saat tegangan dari generator berubah-ubah akibat perubahan kecepatan . Komponen *boost converter* biasanya berupa MOSFET yang berperan sebagai *switching* berkecepatan tinggi. Pengaktifan Mosfet dilakukan dengan membangkitkan sinyal modulasi lebar pulsa (PWM) yang diumpankan ke MOSFET. Pengaturan tegangan dilakukan dengan mengatur nilai *duty cycle* PWM yang diumpankan ke MOSFET.



Gambar 3 Rangkaian *Boost Converter*

Tegangan output *boost converter* adalah :

$$V_o = V_{in} \frac{1}{1 - D} \tag{13}$$

Duty cycle :

$$D = \frac{V_o - V_{in}}{V_o} \tag{14}$$

Jika R adalah beban, I_o arus output, maka nilai R adalah :

$$R = \frac{V_o}{I_o} \tag{15}$$

Untuk menghitung nilai minimum inductor :

$$L = \frac{D (1 - D^2)R}{2f} \tag{16}$$

Dengan : f = frekuensi *chopping*

R = resistansi beban

D = *Duty cycle*

Nilai kapasitor ditentukan dengan :

$$C = \frac{V_o D}{R \Delta V_o f} \tag{17}$$

Dengan :

$$\Delta V_o = \text{ripple tegangan output} \tag{18}$$

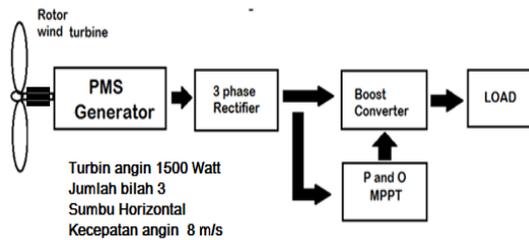
Generator PMSG

Generator PMSG (*permanent Magnet synchronous Generator*), merupakan generator sinkron dengan sistem eksitasi menggunakan magnet permanen sehingga memiliki beberapa kelebihan seperti bobot lebih ringan, harga murah untuk skala kecil, rugi-rugi rendah dan mudah pemeliharaan, namun untuk ukuran besar biaya magnet

menjadi mahal sehingga PMSG ini hanya diperuntukkan untuk kapasitas kecil. Kelebihan lain PMSG ini dapat bekerja pada operasi kecepatan yang rendah (*low speed*) sehingga tidak diperlukan *gear box*, oleh karena itu PMSG umumnya banyak digunakan untuk pembangkit listrik tenaga (*wind turbine*) berskala kecil.

III. METODE

Desain turbin diperlihatkan dalam gambar dibawah ini.



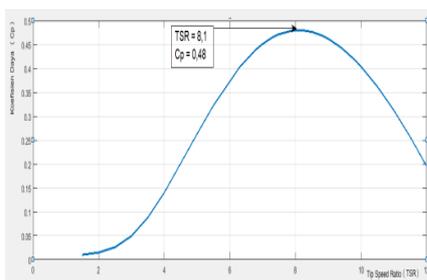
Gambar 4 desain turbin a 1500W

Penelitian diawali dengan mencari nilai TSR yang optimal agar diperoleh koefisien daya maksimal. Berdasarkan nilai TSR tersebut dapat ditentukan ukuran rotor turbin seperti panjang bilah, diameter rotor, luas sapuan turbin, daya dan torsi mekanik. Untuk generator listrik dipilih tipe PMSG karena generator tipe ini dapat beroperasi pada kecepatan yang rendah sehingga tidak memerlukan *gearbox*. Perancangan lain meliputi perhitungan induktans dan capacitor *boost converter*, perancangan MPPT melalui algoritma *P and O* dan rangkaian *trigger* untuk *boost converter*. Pengujian dilakukan melalui pemodelan turbin, boost converter, MPPT, *trigger circuit*, baterai dan beban dengan menggunakan *software Simulink Matlab* untuk mengetahui unjuk kerja dari hasil desain tersebut diatas. Pengujian dilakukan dalam berbagai macam hal seperti pengujian rotor turbin, pengujian generator PMSG, pengujian *boost converter*, MPPT dan pengujian turbin angin dalam beberapa keadaan seperti pengujian saat terjadi perubahan kecepatan, perubahan beban dan pengujian pengisian baterai.

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi nilai optimal TSR adalah 8,1 dengan koefisien daya maksimum $C_p = 0,48$ seperti diperlihatkan dalam gambar 5. Dengan asumsi efisiensi generator $\eta = 0,9$ dan daya output generator 1500 watt, maka daya mekanik turbin adalah :

$$P_m = \frac{P_e}{\eta} = \frac{1500}{0,9} = 1666 \text{ watt}$$



Gambar 5 nilai optimal TSR

Desain kecepatan nominal $V = 8$ meter/detik, kerapatan udara adalah $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ maka dapat dihitung radius bilah :

$$R = \sqrt{\frac{2 P_m}{C_p \pi \rho V^3}} = 1,878 \text{ meter}$$

Diameter rotor turbin $D = 2 \times 1,878 = 3,755$ meter

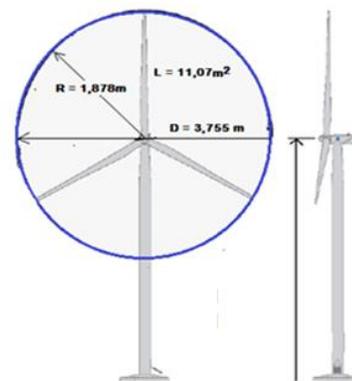
$$A = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi = 11,07 \text{ m}^2$$

Kecepatan sudut angular rotor pada kecepatan angin konstan 8 meter/detik untuk tip ratio $\lambda = 8,1$:

$$\omega = \frac{\lambda V}{R} = 34,5 \text{ rad/s}$$

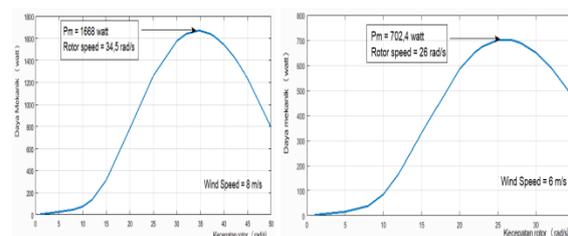
Pengujian rotor turbin

Berdasarkan persamaan-persamaan (2,3), (2,4), (2,5), (2,9) dan (2,10) maka dapat digunakan untuk melakukan pengujian kinerja rotor turbin berdasarkan hasil rancangan diatas. Hasil pengujian untuk kecepatan nominal adalah 8 meter/detik, mencapai daya mekanik maksimum 1668 watt dengan torsi 48,34 Nm pada kecepatan angular rotor yang optimal 34,5 rad/s.



Gambar 6 desain rotor turbin

Hasil tersebut sudah sesuai dengan desain. Namun saat kecepatan diturunkan menjadi 6 meter/detik, daya mekanik maksimum turun mencapai 702,4 watt dan torsi 26,5 Nm pada kecepatan angular rotor optimal 26,5 rad/detik



Gambar 7 hasil pengujian rotor turbin

Tabel 1 Daya mekanik maksimum dan kecepatan rotor turbin yang optimal untuk tiap perubahan kecepatan angin

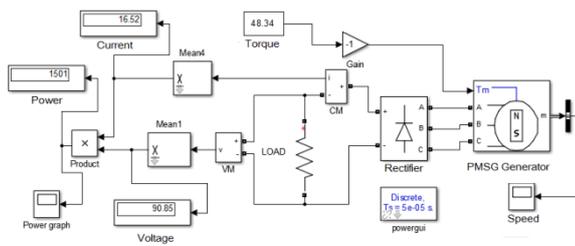
Kecepatan angin (m/detik)	Kecepatan angular rotor turbin (rad/detik)	Daya Mekanik (watt)	Torsi Mekanik (Nm)
3	13,1	87,91	6,711
4	17,2	208,5	12,12
5	21,9	406,9	18,58
6	26,6	702,4	26,5
7	33,0	117	37,24
8	34,5	1668	48,34

Tabel 1 memperlihatkan perolehan daya mekanik dan torsi maksimum untuk kecepatan sudut angular rotor turbin yang optimal

Berdasarkan hasil simulasi terlihat dengan jelas bahwa perubahan kecepatan angin secara signifikan menurunkan perolehan daya mekanik dan torsi mekanik turbin angin, meskipun rotor turbin berputar pada kecepatan sudut angular yang optimal.

Pengujian Generator PMSG

Pengujian generator PMSG bertujuan untuk mengetahui daya listrik maksimum yang dapat dihasilkan oleh generator tersebut jika diberikan torsi maksimum yang merupakan keluaran dari rotor turbin. Melalui rangkaian model generator PMSG pada gambar 8 diperoleh hasil berupa daya output generator 1501 watt, tegangan 90,85 volt dan arus 16,52 ampere saat diberikan torsi maksimum 48,34 Nm. Hasil ini merupakan daya listrik maksimum generator yang telah sesuai dengan rancangan yang diinginkan.



Gambar 8 rangkaian pengujian generator PMSG

Desain boost converter

Desain *boost converter* didasarkan pada hasil dari pengujian generator PMSG untuk menghitung nilai induktor dan kapasitor.

Desain parameter boost converter :

Tegangan input $V_{in} = 25$ volt

Tegangan output $V_o = 90,85$ volt

Ripple voltage $\Delta V = 3$ volt

Arus output maksimum $I_o = 16,52$ ampere

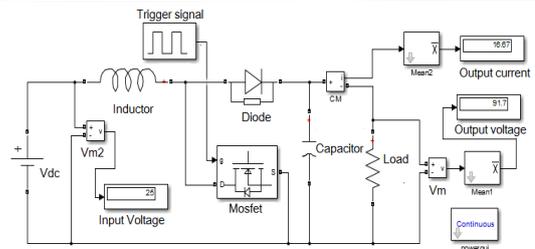
Frekuensi *chopping* $f = 10$ KHZ

$$\text{Duty cycle : } D = \frac{V_o - V_{in}}{V_o} = 0,725$$

$$\text{Beban : } R = \frac{V_o}{I_o} = \frac{90,85}{16,52} = 5.5 \text{ ohm}$$

$$\text{Induktor : } L = \frac{D(1-D^2)R}{2f} = 9.61 \mu\text{H}$$

$$\text{Kapasitor : } C = \frac{V_o D}{R \Delta V_{of}} = 0,3927 \text{ mF}$$

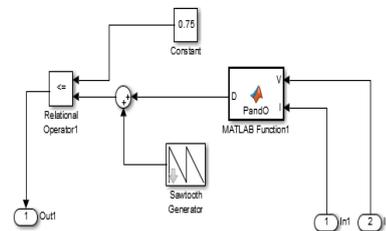


Gambar 9 rangkaian uji boost converter

Hasil pengujian *boost converter* : Tegangan input 25 volt, tegangan output 91,7 volt dan arus output 16,67 ampere.

Perancangan MPPT dan Rangkaian Penyalan

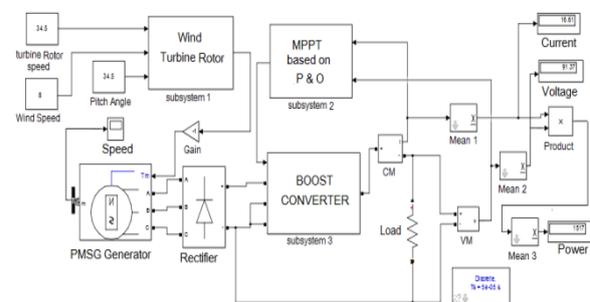
Desain MPPT didasarkan algoritma *P and O* seperti diperlihatkan pada *flowchart* gambar 2. Hasil keluaran dari algoritma *P and O* ini digunakan untuk membangkitkan sinyal *duty cycle* yang digunakan untuk menyalakan MOSFET pada *rangkai boost converter*. Frekuensi yang dibangkitkan untuk *duty cycle* adalah 10 kHz melalui pembangkitan sinyal *sawthooth generator*



Gambar 10 MPPT dan trigger circuit

Model Turbin Angin

Pemodelan turbin angin terdiri atas pemodelan *wind turbine rotor*, *rectifier*, *boost converter*, MPPT dan *trigger circuit*, *PMSG generator* dan *load*. Pemodelan menggunakan Simulink-matlab seperti diperlihatkan dalam gambar dibawah ini.



Gambar 11 model sistem turbin angin

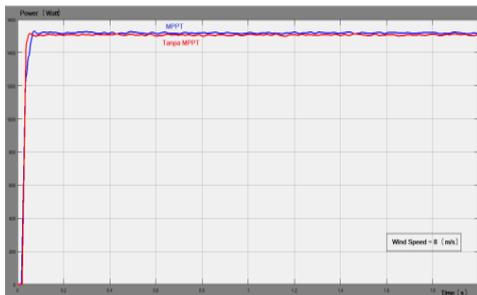
Pengujian Turbin Angin

Berdasarkan model turbin dengan MPPT seperti pada gambar 11 dilakukan pengujian secara simulasi untuk mengetahui kinerjanya. Pengujian dilakukan untuk kondisi pada kecepatan a nominal yaitu 8 meter/detik. Hasil pengujian memperlihatkan tegangan output adalah 91,37 volt, arus output 16,61 ampere, dan daya output 1517 watt.



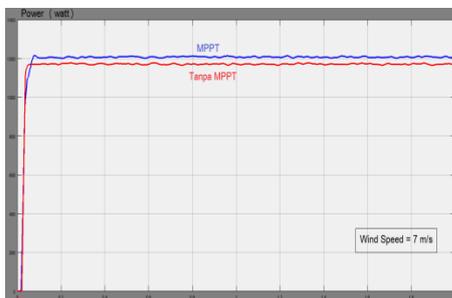
Gambar 12 grafik daya keluaran turbin saat diberikan kecepatan nominal 8 meter/detik

Untuk mengetahui kinerja MPPT, maka dilakukan pengujian turbin angin tanpa memakai MPPT, hasilnya memperlihatkan tegangan output adalah 90,79 volt, arus output 16,51 ampere dan daya 1509 watt.



Gambar 13 grafik perbandingan daya turbin antara MPPT dan tanpa MPPT pada kecepatan 8 meter/detik

Dengan membandingkan hasil antara MPPT dan tanpa MPPT, terlihat bahwa daya listrik yang dihasilkan turbin angin melalui MPPT lebih tinggi, Pengujian berikutnya adalah dengan menurunkan kecepatan menjadi 7 meter /detik, maka terlihat bahwa dengan MPPT tegangan output adalah 98,29 volt, arus output 12,29 ampere dan daya output 1208 watt. Sedangkan tanpa MPPT tegangan output adalah 96,43 volt, arus output 12,05 ampere dan daya output 1168 watt.



Gambar 14 grafik perbandingan daya turbin antara MPPT dan tanpa MPPT pada kecepatan 7 meter/detik

Gambar 14 memperlihatkan perbandingan perbedaan daya turbin antara MPPT dan tanpa MPPT jika kecepatan 7 meter/detik. Terlihat bahwa daya yang dihasilkan melalui MPPT masih lebih tinggi dibandingkan tanpa MPPT.

Pengujian dengan perubahan Pembebanan

Skenario pengujian ini adalah dengan memberikan kecepatan konstan 8 meter/detik dengan beban awal 5,5

ohm, selanjutnya 1,5 detik kemudian terjadi perubahan beban menjadi 3,55 ohm.



Gambar 15 grafik karakteristik tegangan turbin angin saat terjadi perubahan beban

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa pada awalnya tegangan output turbin angin adalah 91,59 volt, dengan arus beban 16,65 ampere dan daya beban 1521 watt, namun saat terjadi perubahan beban terlihat ada penurunan tegangan secara signifikan menjadi 54,87 volt, arus beban 15,46 ampere dan daya beban 877,7 watt. Tabel 2 memperlihatkan nilai tegangan, arus dan daya beban saat terjadi perubahan beban, baik untuk turbin angin memakai MPPT maupun tanpa MPPT. Berdasarkan hasil pengujian dengan perubahan beban dapat disimpulkan bahwa tegangan keluaran dari turbin angin ini selain dipengaruhi oleh perubahan kecepatan angin, juga dipengaruhi oleh perubahan beban, oleh karena itulah turbin angin tidak bisa langsung digunakan ke beban melainkan harus disimpan terlebih dahulu melalui baterai agar tegangan tetap dalam kondisi stabil meskipun terjadi perubahan beban.

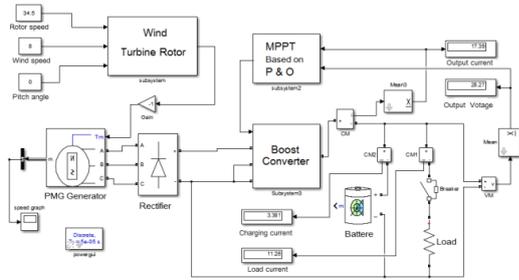
Tabel 2 Hasil pengujian turbin angin terhadap perubahan beban

Kondisi Turbin	R. Load (ohm)	Tegangan (volt)	Arus Beban (ampere)	Daya Beban (Watt)
Dengan MPPT	5,5	91,59	16,65	1521
	3,55	54,87	15,46	877,70
Tanpa MPPT	5,5	91,14	16,57	1509
	3,55	57,29	16,41	879,9

Pengisian Baterai

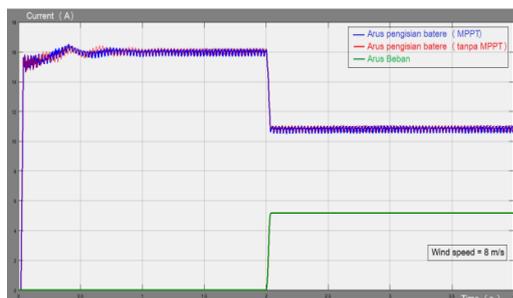
Seperti telah diketahui tegangan yang berubah-ubah dari turbin, menyebabkan daya output turbin tidak bisa secara langsung digunakan oleh beban, oleh karena itu daya output turbin disimpan terlebih dahulu didalam baterai. Untuk mengetahui kinerja MPPT pada pengisian baterai, maka digunakan rangkaian simulasi seperti terlihat dalam gambar 16.

Skenario pengujian adalah sebagai berikut : Pada awalnya turbin tidak dibebani oleh R beban, sehingga tidak ada arus beban, dengan demikian arus keluaran turbin sepenuhnya digunakan untuk pengisian baterai. Setelah 2 detik maka beban dihubungkan melalui *circuit breaker*, yang mana pengujian dilakukan pada kondisi kecepatan konstan 8 meter/detik.



Gambar 16 rangkaian simulasi pengisian batere turbin

Berdasarkan hasil pengujian terlihat bahwa sebelum waktu mencapai 2 detik, arus pengisian batere mencapai 15,35 ampere (tanpa MPPT) dan 16,46 ampere, namun saat mencapai 2 detik, beban terhubung dengan turbin sehingga mengalir arus beban sebesar 5,17 ampere, hal ini akan mengakibatkan arus pengisian mengalami penurunan menjadi 10,66 ampere (tanpa MPPT) dan 11,31 ampere (MPPT).



Gambar 17 Grafik karakteristik pengisian batere

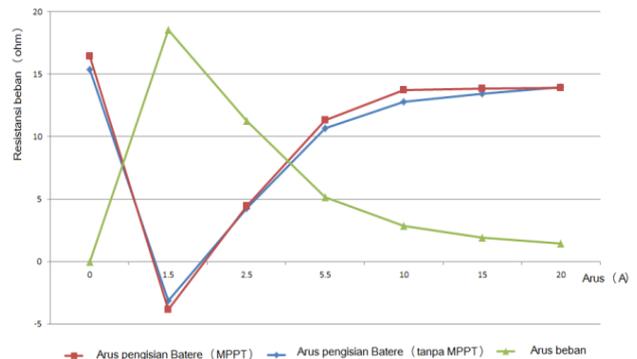
Tabel 3 memperlihatkan hasil pengujian untuk beberapa perubahan beban. Terlihat bahwa semakin besar arus beban maka semakin kecil arus pengisian pada batere tersebut, namun saat arus beban lebih tinggi dari arus output turbin (16,52 ampere) maka arus beban akan ditarik tidak saja dari turbin melainkan juga ditarik dari batere sehingga batere akan menyuplai daya ke beban. Seperti saat R beban 1,5 ohm dengan arus beban 18,55 ampere, maka arus disuplai dari turbin sebesar 15,41 ampere dan 3,14 ampere (dalam tabel bertanda negatif) diambil dari batere

Tabel 3 Hasil pengujian pengisian arus ke batere

Kondisi Turbin	R Load (ohm)	Tegangan (volt)	Arus Pengisian (ampere)	Arus Beban (ampere)
Tanpa MPPT	0	28,66	15,35	0
	1,5	28,02	-3,14	18,55
	2,5	28,23	4,29	11,25
	5,5	28,47	10,66	5,17
	10	28,57	12,79	2,85
	15	28,60	13,44	1,91
MPPT	0	28,66	16,46	0
	1,5	28,02	-2,87	18,55
	2,5	28,23	4,47	11,25
	5,5	28,48	11,31	5,17
	10	28,57	13,72	2,85
	15	28,60	13,82	1,91

Berdasarkan hasil simulasi pada tabel 3 terlihat kinerja MPPT dapat memberikan arus pengisian yang lebih tinggi dibandingkan tanpa MPPT meskipun terjadi perubahan beban. Ketika arus beban lebih tinggi dari turbin terlihat

bahwa batere yang dilengkapi oleh turbin memberikan arus yang lebih kecil ke beban dibandingkan batere tanpa MPPT. Pada gambar 18 memperlihatkan grafik pengisian arus pada batere untuk berbagai kondisi perubahan beban.



Gambar 18. Grafik arus pengisian batere untuk berbagai perubahan pembebanan turbin angin

Terlihat kapasitas arus maksimal turbin yang mencapai 16,4 Ampere yang terjadi saat tidak diberikan beban, namun ketika diberikan beban tinggi dengan arus beban melebihi kapasitas turbin angin maka batere akan mengeluarkan arus untuk diberikan ke beban (terlihat dalam grafik tersebut arus pengisian jatuh ke nilai negatif , yang menandakan arus keluar dari turbin angin. Namun saat arus beban turun secara berangsur-angsur, maka arus pengisian secara berangsur-angsur bertambah besar. Terlihat dalam gambar 17 grafik arus pengisian pada turbin angin dengan MPPT lebih tinggi dibandingkan tanpa menggunakan MPPT. Dari Hasil-hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap unjuk kerja turbin angin 1500 Watt, dapat diketahui bahwa turbin dapat bekerja secara optimal jika dikenakan kecepatan angin nominal yaitu 8 meter /detik sesuai dengan rancangan awal.

IV KESIMPULAN

Desain turbin 1500 Watt yang optimal didasarkan pada nilai tip speed ratio yang optimal 8,1 dengan koefisien daya mencapai 0,48. Kecepatan angin dipilih 8 meter/detik dalam desain ini. Berdasarkan nilai tersebut menghasilkan desain turbin angin dengan radius bilah rotor 1,878 meter, diameter rotor 3,755 meter dan luas sapuan angin 11,07 m² yang mampu menangkap daya listrik sebesar 1517 watt pada tegangan 91,37 volt dan arus 16,61 ampere jika menggunakan MPPT. Nilai tersebut diatas akan tercapai hanya apabila kecepatan angin sesuai dengan desain yaitu 8 meter/detik. Perubahan kecepatan angin secara signifikan akan berpengaruh terhadap daya keluaran turbin angin. Pemakaian MPPT mampu menghasilkan daya keluaran turbin angin lebih tinggi dibandingkan tanpa MPPT, terlebih pada saat pengisian batere meskipun terjadi perubahan pembebanan pada turbin angin.

REFERENSI

[1] Abdullah M.A, Yatim A.H.M, Tan C.W., Saidur R. (2012), "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energi sistems", Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 3220- 3227

-
- [2] Andriani,(2018) “*Perancangan Pembangkit Listrik Kincir Angin Menggunakan Generator Dinamo Drillini Terhadap Empat Sumbu Horizontal*”, Jurnal Instek Vol.3 No.1, April , P-ISSN 2541-1179. E-ISSN 2581-1711
- [3] Helmi Cahya Prasetyo,(2018) “*Optimalisasi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Maximum Power Point Tracker (MPPT) Dengan Metode Perturb And Observe (P&O)*”, Jurnal Teknik Elektro. Volume 07 Nomor 02 Tahun 2018, 77 – 83
- [4] Hilmansyah, Risty Jayanti Yuniar, Ramli,(2017) “*Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Kendali PI*”, Jurnal Sains Terapan No.1 Vol.2 April 2017, ISSN 2406-8810
- [5] K.Vigneswaran, Dr P.Suresh Kumar, “*Maximum Power Poin Tracking Method in Wind Power Sistem*”, Internationa Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, Vol. 5, Issue 1, Januray 2016, ISSN(Online): 2319-8753, ISSN (Print): 2347-6710
- [6] M.A. Yurdusev2, N.S Cetin, R. Ata (2006)’, *Assessment Of Optimum Tip Speed Ratio Of Wind Turbines* “, Energy , volume 31, Issue 12, September.pp: 2153-2161.
- [7] Machmud Efendi, (2015) “*Penggunaan Teknologi MPPT (Maximum Power Point Tracker) Pada Sistem Pembangkit Tenaga Angin*”, TRANSMISI, 17, (4), Oktober , e-ISSN 2407–6422, 195
- [8] Muhammad Otong, Rifai Mardanie Bajuri, dkk, (2016) “*Maximum Power Poin Tracking Pada Sistem Pembangkit Tenaga Listrik Tenaga Angin Menggunakan Buck Boost Converter*”, Jurnal Ilmiah SETRUM – Volume 5, No.2, Desember 2016 p-ISSN : 2301-4652 / e-ISSN : 2503-068X
- [9] Muhammad Rinaldy Robiansyah,(2017) “*Perancangan Kontroler Untuk Turbin Angin Skala Kecil*”, Seminar Nasional Teknoka, Vol. 2, 2017 ISSN No. 2502-8782
- [10] Melaluca Leuca Dendron Kadarnis, Amir Hamzah,(2019) “*Desain dan Simulasi Maximum Power Point Tracking (MPPT) Perturb and Observe (P&O) Dengan Kendali Arduino Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin Kecepatan Rendah*”, Jom FTEKNIK Volume 6 Edisi , Januari.
- [11] Memet Bakirci, Seyazi Yilmaz, (2018),” *Theoretical and Computational Investigations of The Optimal Tip Speed Ratio of Horizontal Axis Wind Turbines*” Engineering Science and Technology, an International Journal”, volume 21, December, pp : 1128-1141. ISSN 2215-0986
- [12] Nur Asyik Hidayatullah, Hanifah Nur Kumala Ningrum, (2016)” *Optimalisasi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin Turbin Sumbu Horizontal dengan Menggunakan Metode Maximum Power Point Tracker*”, Journal of Electrical Electronic Control and Automotive Engineering (JEECAE) JEECAE Vol.1, No.1, Oktober.