

OPTIMALISASI DAYA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGGUNAKAN MAXIMUM POWER POINT TRACKER (MPPT) DENGAN METODE PERTURB AND OBSERVE (P&O)

Helmi Cahyo Prasetyo

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

e-mail: helmicahyo28@gmail.com

Endryansyah

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

e-mail: endryansyah@gmail.com

Abstrak

Energi angin merupakan energi yang dapat dijadikan salah satu energi alternatif yang ramah lingkungan dan memiliki potensi yang cukup besar sebagai pembangkit listrik. Dalam penelitian ini dilakukan studi tentang Optimalisasi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) Dengan Metode *Perturb and Observe* (P&O). Metode tersebut bekerja dengan mengukur tegangan dan arus pada beban, kemudian kontrol ini dipasang pada konverter sisi generator dengan tujuan untuk memaksimalkan ekstraksi daya yang ada. Sehingga dalam penelitian ini nantinya akan ditunjukkan bahwa dengan menggunakan kontrol MPPT dapat mengekstraksi daya maksimum serta mampu mengatur tegangan keluaran dalam berbagai kondisi angin mulai dari 5 m/s sampai 10 m/s.

Kata Kunci: Turbin angin, MPPT, *Perturb and Observe*.

Abstract

Wind energy is an energy that can be used as one of the alternative energy that is environmentally friendly and has considerable potential as a power plant. In this study conducted a study on Optimizing the Power of Wind Power Generators Using Maximum Power Point Tracker (MPPT) With Perturb and Observe Method (P & O). The method works by measuring the voltage and current on the load, then this control is installed on the generator side converter in order to maximize the extraction of existing power. So in this research will be shown that by using MPPT control can extract maximum power and able to set the output voltage in various wind conditions ranging from 5 m/s to 10 m/s.

Keywords: Wind turbine, MPPT, *Perturb and Observe*.

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Angin sebagai salah satu penghasil energi listrik mengalami perkembangan yang cukup pesat. Hal ini disebabkan karena kelebihan-kelebihan yang dimiliki oleh pembangkit tersebut, seperti ramah lingkungan, bebas polusi dan merupakan penghasil energi listrik yang dapat diperbaharui. Seiring dengan perkembangan semikonduktor dan elektronika daya maka pembangkit listrik tenaga angin juga semakin banyak digunakan dalam sistem tenaga. Pada tahun 2006, di Eropa, negara yang mempunyai kapasitas total generator tenaga angin terbesar adalah Jerman dengan 20621 MW. Spanyol dan Amerika Serikat di urutan kedua dan ketiga dengan lebih dari 11603 MW. Berdasarkan data GWEC (*Global Wind Energy Council*), pertumbuhan pembangunan generator tenaga angin sebesar 32 % dari tahun 2005 [7].

Kebanyakan negara kaya akan memakai *renewable energy* sebagai sumber dayanya, namun, ada

beberapa daerah yang berada di daerah terpencil tidak tersedia jaringan listrik sehingga tidak dapat menikmati listrik tersebut. Maka dengan pembangkit skala kecil yang sistemnya berdiri sendiri seperti *wind turbine* menggunakan (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) PMSG yang teresitasi sendiri ini, diharapkan dapat memberikan pasokan daya listrik bagi mereka yang berada di daerah terpencil yang tidak tersedia jaringan listrik [1].

Pembangkit listrik tenaga angin sangat sesuai untuk negara kepulauan seperti di Indonesia. Pembangkit listrik tenaga angin mampu dibangun di daerah-daerah yang tidak terjangkau listrik karena jauh dari pusat pembangkit, sehingga rasio elektrifikasi mampu meningkat [5].

Pada penelitian ini akan menganalisis MPPT dengan menggunakan algoritma *Pertube and Observe* untuk memaksimalkan daya. Tujuan penggunaan *boost converter* untuk menaikkan tegangan kerja turbin angin agar sesuai dengan tegangan yang dibutuhkan.

KAJIAN PUSTAKA

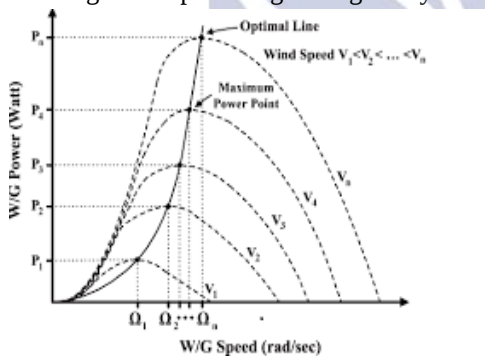
Turbin Angin

Turbin angin adalah sistem konversi energi untuk menghasilkan energi listrik dengan proses pengubahan energi angin menjadi putaran mekanis rotor. Dan selanjutnya menjadi energi listrik melalui sebuah generator. Sistem konversi energi angin ini merupakan suatu sistem/peralatan yang berfungsi untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik, mekanis, atau bentuk energi lainnya [1].

Turbin angin mengambil energi angin dengan menurunkan kecepatannya. Untuk bisa mencapai 100% efisien, maka sebuah turbin angin harus menahan 100% kecepatan angin yang ada, dan rotor harus terbuat dari piringan *solid* dan tidak berputar sama sekali, yang artinya tidak ada energi kinetik yang akan dikonversi [6].

Karakteristik Turbin Angin

Menurut sumber [5], karakteristik dari turbin angin dapat dilihat dari kurva hubungan antara kecepatan rotor (ω_r) dengan daya yang dihasilkan (ω_r -P) dan kurva hubungan kecepatan angin dengan daya.



Gambar 1. Kurva Hubungan Kecepatan Rotor Dengan Daya Pada Kecepatan Angin Yang Bervariasi.

Dari Gambar 1 juga dapat dilihat bahwa daya maksimal yang dihasilkan setiap kecepatan angin berbeda. Daya yang ditangkap oleh turbin angin P_m adalah fungsi dari bentuk dari baling-baling, *pitch angle*, diameter baling-baling dan kecepatan rotasi motor.

$$P_m = C_p \times P_w \quad (1)$$

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

$$A = (\pi/4)R^2 \quad (3)$$

Dimana:

$$P_m = \text{daya mekanik (Watt)}$$

$$P_w = \text{daya angin (Watt)}$$

$$C_p = \text{koefisien daya pada turbin angin (rad/s)}$$

$$\pi = \text{phi (3,14)}$$

$$R = \text{jari-jari blade pada turbin angin (m)}$$

$$\rho = \text{kerapatan udara (kg/m}^3\text{) (pada 15}^0\text{C dan tekanan 1 atm, } \rho = 1.225 \text{ kg/m}^3\text{)}$$

$$A = \text{luas area turbin yang dilewati angin (m}^2\text{)}$$

$$v = \text{kecepatan angin (m/s)}$$

Hubungan antara *tip speed ratio*, *pitch angle*, dan koefisien daya pada turbin angin dapat digambarkan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-c_5/\lambda i} + c_6 \lambda \quad (4)$$

Dengan

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (5)$$

Dimana:

$C_p(\lambda, \beta)$ = perkalian koefisien daya pada turbin angin antara *tip speed ratio* dengan *pitch angle*

λ = *tip speed ratio* (kecepatan rotor dibanding kecepatan angin)

β = *pitch angle* (0)

e = eksponensial

$c_1 - c_6$ = konstanta/koefisien empiris

Menurut model *wind turbine* di simulink MATLAB, nilai koefisien c_1 sampai dengan c_6 adalah: $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$, dan $c_6 = 0.0068$

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Dalam penelitian ini, energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin diubah menjadi energi listrik oleh generator sinkron magnet permanen (PMSG), karena PMSG sangat tepat untuk pembangkit listrik skala kecil yang berdiri sendiri tanpa memerlukan eksitasi dari luar. Untuk aplikasi daya yang besar menggunakan generator sinkron, generator sinkron menggunakan eksitasi diciptakan rotor sehingga menimbulkan medan putar yang akan menghasilkan terbelah di stator. Jenis generator ini tidak perlu sistem eksitasi karena sumber eksitasi disediakan oleh magnet permanen pada rotor. Kontrol tegangan tidak diperlukan, sehingga mengurangi kesulitan dalam mengendalikan. PMSG digunakan terutama untuk aplikasi turbin tenaga angin yang rendah [1].

Seperti halnya prinsip generator sinkron terdapat hubungan antara frekuensi dan kecepatan ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$n = \frac{120 f}{p} \quad (6)$$

Dimana:

n = kecepatan rotor
 f = frekuensi
 p = jumlah pasang kutub.

Maximum Power Point Tarcker (MPPT)

Maximum Power Point Tracker atau yang sering disebut MPPT adalah metode pelacakan nilai daya maksimum dari suatu sistem. Pada suatu titik tertentu sistem tersebut memiliki nilai daya maksimum. Daya keluaran yang maksimal ini akan menghasilkan efisiensi yang tinggi. Prinsip kerja dari MPPT adalah dengan menaikkan dan menurunkan tegangan kerja. Hal tersebut dapat dilakukan dengan mengatur *duty cycle* pada konverter. Perubahan besar nilai daya tergantung dari perubahan nilai tegangan dan arus.

Pada turbin angin, MPPT digunakan untuk mengoptimalkan keluaran daya maksimum dari generator. Setiap kecepatan angin memiliki daya maksimum yang berbeda-beda. Generator yang terhubung dengan turbin angin akan menghasilkan daya maksimum apabila metode yang digunakan pada MPPT dapat bekerja sesuai dengan karakteristik angin [2].

Pertube and Observe

Metode Pertube and Observe (P&O) dapat digunakan untuk menentukan titik optimum. Dengan menggunakan metode P&O, nilai daya maksimum bias didapatkan tanpa harus mengetahui karakteristik dari sistem turbin angin. Nilai daya maksimum didapatkan dengan cara mengatur besaran tegangan dc pada konverter. Dengan perubahan besar tegangan dc pada konverter, maka nilai daya juga akan berubah. Metode ini mengatur dan mengamati setiap perubahan tersebut. Perubahan ditentukan pada step-size (ΔD) tertentu dan waktu tertentu. Besar nilai daya listrik yang dihasilkan dibandingkan dengan daya listrik sebelumnya. Hal ini menentukan variabel ΔD berikutnya. Jika besar nilai daya yang dihasilkan meningkat maka variabel ΔD akan bernilai tetap, sebaliknya jika besar nilai daya yang dihasilkan menurun maka variabel ΔD akan berubah [2].

Boost Converter

Boost converter dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dibanding tegangan masukannya (penaik tegangan). Komponen utama dari

boost converter ialah induktor, kapasitor, dioda dan switch saklar (MOSFET) [3].

Saat saklar atau switch MOSFET pada kondisi tertutup (t_{on}), arus akan mengalir ke induktor sehingga menyebabkan energi yang tersimpan di induktor naik. Saat saklar MOSFET terbuka (t_{off}), arus induktor ini akan mengalir menuju beban melewati dioda sehingga energi yang tersimpan energi di induktor akan turun. Pada saat t_{off} beban akan disuplai oleh tegangan sumber ditambah tegangan induktor yang sedang melepaskan energinya. Kondisi ini yang menyebabkan tegangan keluaran menjadi lebih besar dibandingkan dengan tegangan masukannya. Rasio antara tegangan keluaran dan tegangan masukan konverter sebanding dengan rasio antara periode penyaklaran dan waktu pembukaan saklar.

Untuk menentukan nilai komponen-komponen untuk boost converter setelah turbin angin dilakukan dengan perhitungan menggunakan persamaan-persamaan di bawah ini:

Perhitungan *duty cycle* (D)

$$D = \left(1 - \frac{V_{in-min}}{V_{out}} \right) \quad (7)$$

Dimana:

D = *duty cycle*
 V_{in-min} = tegangan input generator minimal
 V_{out} = tegangan output

Perhitungan nilai induktor (L)

$$\Delta i_L = 0.4 x i_{in} \quad (8)$$

$$L = \frac{1}{f} x (V_{out} + V_f - V_{in}) x \left(\frac{V_{in}}{V_{out} + V_f} \right) x \left(\frac{1}{\Delta i_L} \right) \quad (9)$$

Dimana:

Δi_L = riak arus induktor
 L = induktor
 V_f = tegangan foward

Perhitungan nilai kapasitor (C)

$$i_{out} = i_{in} \left(\frac{V_{in}}{V_{out} + V_f} \right) \quad (10)$$

$$i_{Dpeak} = \frac{i_{out}}{D} \quad (11)$$

$$i_{Drms} = i_{Dpeak} \times \sqrt{D} \quad (12)$$

$$i_{Crms} = \sqrt{i_{Drms}^2 \times i_{out}^2} \quad (13)$$

$$\Delta V_o = \text{ripple tegangan output} \times V_o \quad (14)$$

Dimana:

i_{out} = arus output konverter
 i_{in} = arus input konverter
 V_{in} = tegangan input konverter
 i_{Dpeak} = nilai puncak arus drain
 i_{Drms} = nilai arus drain root mean square (drms)
 i_{Crms} = nilai arus cycle root mean square (crms)
 ΔV_o = riak tegangan kapasitor (%)

Maka:

$$C = \frac{i_{Crms} \times D \times T}{\Delta V_o} \quad (15)$$

Dimana:

T = periode

METODE PENELITIAN

Parameter Turbin Angin dan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Dalam penelitian ini akan dirancang turbin angin dengan daya 3000 Watt. Maka didapat parameter-parameter dari turbin angin ditujukan dalam Tabel 1 dibawah ini:

Tabel 1. Parameter Turbin Angin

No	Variabel	Keterangan
1	Daya output mekanik	3 kW at 10 m/s
2	Daya dasar	3 kW/0.9 VA
3	Daya nominal mekanik	0.8 pu
4	Kecepatan dasar motor	1 pu
5	Pitch angle	0 Deg

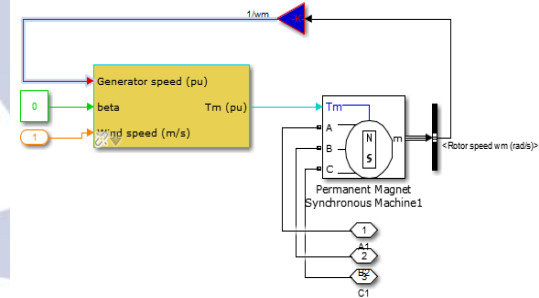
Untuk mengubah menjadi energi kinetik, daya keluaran mekanik turbin angin diubah menggunakan generator jenis *permanent magnet synchronous*

generator atau disingkat dengan PMSG, dalam Matlab disediakan perangkat dengan nama *Permanent Magnet Synchronous Machine* (PMSM) dengan beberapa parameter-parameter yang sudah disediakan, PMSG yang dipakai didesain sesuai turbin angin dengan kapasitas 4000 Watt. PMSG digunakan untuk menghasilkan tegangan dari hasil putaran turbin angin. Spesifikasi generator PMSG ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter PMSG

No	Variabel	Keterangan
1	Tipe rotor	Round
2	Gelombang EMF	Sinusoidal
3	Input mekanik	Torque Tm
4	Resistansi stator (Rs), Induktansi stator (H)	0.18 ohm, 0.00167 H

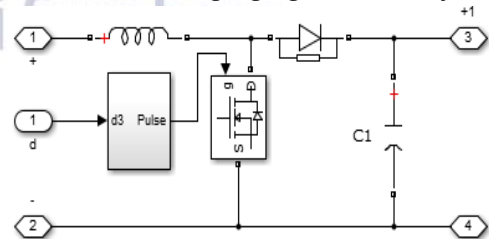
Pada Gambar 2 menunjukkan gambaran simulasi turbin angin dan PMSG yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 2. Model PMSG

Pemodelan Boost Converter

Boost converter sebagai salah satu *regulator mode* pensaklaran menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar dibanding tegangan masukannya.

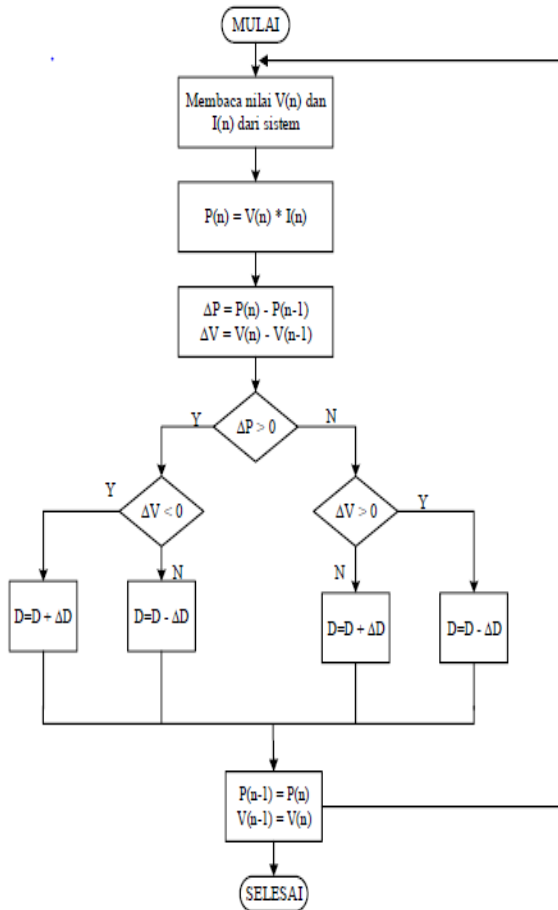


Gambar 3. Rangkaian Boost Converter

Perancangan Algoritma Perturb and Observe

Untuk mendapatkan daya maksimum dari sistem turbin angin dapat menggunakan berbagai metode algoritma MPPT, salah satunya dengan menggunakan

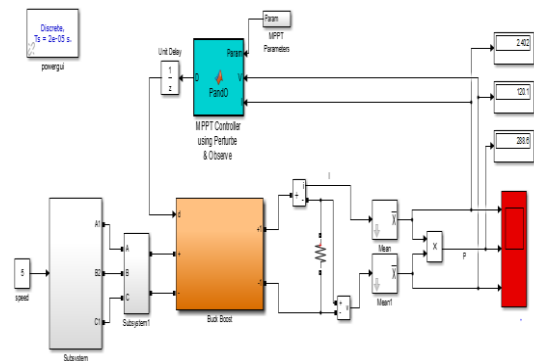
algoritma *Perturb and Observe* (P&O). Metode P&O mempunyai kelebihan yaitu kecepatan trackingnya jauh lebih cepat dibandingkan dengan metode yang lainnya. Akan tetapi, metode ini memiliki kekurangan juga yaitu memiliki osilasi untuk mencapai kondisi *steady state* [4]. Diagram alir MPPT jenis *perturb and observe* ditujukan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Alir MPPT Dengan Menggunakan Algoritma P&O.

Pemodelan sistem keseluruhan

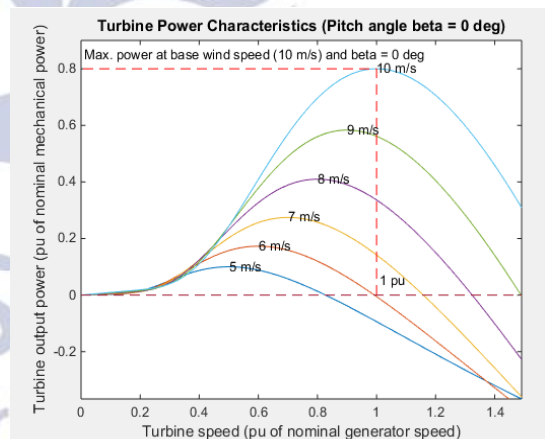
Dari pemodelan blok yang telah dibuat, setiap blok disusun menjadi simulasi MPPT pada rangkaian *boost converter* seperti pada Gambar 5. Dalam simulasi terdapat 1 inputan yaitu kecepatan angin.



Gambar 5. Pemodelan *Plant* Turbin Angin

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada pembahasan sebelumnya sudah dibahas tentang pemodelan sistem dari turbin angin itu sendiri, pada bab ini hasil dari pemodelan akan didapat nilai daya yang bervariasi mengikuti fluktuasi angin itu sendiri. Pada pengujian turbin angin ini sendiri digunakan rating angin mulai dari 5 m/s sampai 10 m/s. Berikut kurva dan tabel nilai daya maksimum pada setiap kecepatan angin, dapat dilihat pada Gambar 6 dan Tabel 3.



Gambar 6. Karakteristik Turbin Angin Kecepatan 5-10 m/s

Tabel 3. Daya Maksimum Pada Setiap Kecepatan Angin

Kecepatan Angin (m/s)	Daya Maksimum (watt)
5	230
6	463
7	824
8	1340
9	2050

10	3000
----	------

Pengujian Tanpa MPPT

Dalam pengujian turbin angin tanpa MPPT, turbin angin yang telah dimodelkan disambungkan ke *rectifier* untuk mendapatkan gelombang DC yang kemudian disambungkan pada beban. Beban dirubah mulai dari 30 ohm sampai 100 ohm. Daya pada beban yang berubah-ubah didapatkan kemudian dirata-rata sehingga didapatkan suatu nilai daya maksimum pada suatu kecepatan angin tertentu. Langkah-langkah tersebut dilakukan untuk semua kecepatan angin yang telah ditentukan.

Pengujian Menggunakan MPPT

Pada pengujian turbin angin dengan MPPT dilakukan dengan menghubungkan *plant* pada beban yang dimana terdapat *rectifier* untuk mengubah ke gelombang DC dan terdapat rangkaian *boost-converter* untuk menaikkan tegangan. Untuk mengatur besarnya tegangan yang dilakukan dengan mengatur *duty cycle*. Perubahan *duty cycle* tersebut mengikuti perubahan kecepatan generator akibat fluktuasi angin. Nilai *duty cycle* di atur pada saat beban bernilai maksimum dan bernilai maksimum pula dititik dimana kecepatan angin tertentu. Beban dirubah mulai dari 30 ohm sampai 100 ohm. Daya pada beban yang berubah-ubah didapatkan kemudian dirata-rata sehingga didapatkan suatu nilai daya maksimum pada suatu kecepatan angin tertentu. Langkah-langkah tersebut dilakukan untuk semua kecepatan angin yang telah ditentukan.

Tabel 4. Daya Beban Tanpa MPPT dan Menggunakan MPPT Pada Kecepatan Angin 5 m/s

R (ohm)	Daya (watt)		Tegangan Output (volt)	
	Tanpa MPPT	Dengan MPPT	Tanpa MPPT	Dengan MPPT
30	181.4	431	73.77	113.7
40	139.6	344.5	74.72	117.4
50	113.9	288	75.45	120.1
60	95.74	249	75.79	122.3
80	72.74	195.1	76.28	124.9
100	58.52	160.9	76.5	126.9

Dari hasil Tabel 4 didapatkan bahwa rata-rata daya kecepatan angin 5 m/s tanpa MPPT adalah 110,31 Watt dan rata-rata daya rata-rata menggunakan MPPT adalah 278 Watt.

Tabel 5. Daya Beban Tanpa MPPT dan Menggunakan MPPT Pada Kecepatan Angin 6 m/s

R (ohm)	Daya (watt)		Tegangan Output (volt)	
	Tanpa MPPT	Dengan MPPT	Tanpa MPPT	Dengan MPPT
30	369.8	842.7	105.3	159
40	286.5	686.2	107.1	165.7
50	233.8	578.7	108.1	170.1
60	198	502.1	109	173.6
80	150.5	395	109.7	177.8
100	121.5	328.1	110.2	181.1

Dari hasil Tabel 5 didapatkan bahwa rata-rata daya kecepatan angin 6 m/s tanpa MPPT adalah 226,68 Watt dan rata-rata daya rata-rata menggunakan MPPT adalah 555,46 Watt.

Tabel 6. Daya Beban Tanpa MPPT dan Menggunakan MPPT Pada Kecepatan Angin 7 m/s

R (ohm)	Daya (watt)		Tegangan Output (volt)	
	Tanpa MPPT	Dengan MPPT	Tanpa MPPT	Dengan MPPT
30	667	1470	141.5	210
40	522.4	1208	144.6	219
50	428.9	1031	146.4	227
60	363.6	901.9	147.7	232.6
80	278.5	714	149.3	239
100	225.5	595.5	150.2	244

Dari hasil Tabel 6 didapatkan bahwa rata-rata daya kecepatan angin 7 m/s tanpa MPPT adalah 414,31 Watt dan rata-rata daya rata-rata menggunakan MPPT adalah 986,73 Watt.

Tabel 7. Daya Beban Tanpa MPPT dan Menggunakan MPPT Pada Kecepatan Angin 8 m/s

R (ohm)	Daya (watt)		Tegangan Output (volt)	
	Tanpa MPPT	Dengan MPPT	Tanpa MPPT	Dengan MPPT
30	1095	2341	181.3	265
40	868.9	1966	186.4	280
50	718.2	1677	189.5	289.6
60	611.4	1474	191.5	297.4
80	472	1181	194.3	307.4
100	383.1	983.8	195.7	313.7

Dari hasil Tabel 7 didapatkan bahwa rata-rata daya kecepatan angin 8 m/s tanpa MPPT adalah 691,43 Watt dan rata-rata daya rata-rata menggunakan MPPT adalah 1603,8 Watt.

Tabel 8. Daya Beban Tanpa MPPT dan Menggunakan MPPT Pada Kecepatan Angin 9 m/s

R (ohm)	Daya (watt)		Tegangan Output (volt)	
	Tanpa MPPT	Dengan MPPT	Tanpa MPPT	Dengan MPPT
30	1685	3471	224.8	322.7
40	1345	2966	231.9	344.4
50	1123	2566	236.9	358.8
60	959.2	2256	239.9	367.9
80	746.7	1825	244.4	382.1
100	609.8	1533	247	391.6

Dari hasil Tabel 8 didapatkan bahwa rata-rata daya kecepatan angin 9 m/s tanpa MPPT adalah 1078,11 Watt dan rata-rata daya rata-rata menggunakan MPPT adalah 2436,16 Watt.

Tabel 9. Daya Beban Tanpa MPPT dan Menggunakan MPPT Pada Kecepatan Angin 10 m/s

R (ohm)	Daya (watt)		Tegangan Output (volt)	
	Tanpa MPPT	Dengan MPPT	Tanpa MPPT	Dengan MPPT
30	2462	3801	271.8	337.7
40	1979	3155	281.3	355.2
50	1661	2732	288.2	369.6
60	1431	2386	293	378.3
80	1120	1916	299.3	391.6
100	919	1627	303.2	403.4

Dari hasil Tabel 9 didapatkan bahwa rata-rata daya kecepatan angin 10 m/s tanpa MPPT adalah 1595,33 Watt dan rata-rata daya rata-rata menggunakan MPPT adalah 2602,83 Watt.

PENUTUP

Simpulan

Setelah melalui proses perencanaan dan simulasi yang kemudian dilanjutkan pada tahap pengujian serta analisa data, maka dapat disimpulkan bahwa dengan metode P dan O untuk metode MPPT turbin angin dapat dibandingkan daya keluarannya, dari pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa turbin angin tanpa menggunakan MPPT memiliki nilai yang berubah akibat bertambahnya beban dan memiliki nilai yang kecil dibandingkan dengan turbin angin yang menggunakan MPPT. Dari hasil simulasi mulai dari kecepatan terendah 5 m/s sampai kecepatan maksimum 10 m/s dengan perubahan beban 30-100 ohm

membuktikan bahwa kinerja kontrol MPPT untuk meningkatkan daya keluaran bekerja dengan baik, dimana untuk kecepatan angin 5 m/s tanpa kontrol rata-rata daya yang dihasilkan 110,31 Watt sedangkan untuk kecepatan yang sama menggunakan kontrol MPPT rata-rata 278 Watt dimana mengalami kenaikan rata-rata sebesar 60%. Untuk kecepatan maksimum 10 m/s, daya keluaran rata-rata yang dihasilkan tanpa kontrol 1595,33 Watt sedangkan daya keluaran rata-rata yang menggunakan MPPT 2602,83 Watt, dan mengalami kenaikan rata-rata sebesar 38%.

Saran

Dari Simpulan sebelumnya, saran untuk penelitian ini adalah MPPT yang digunakan untuk menaikkan daya pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin menggunakan MPPT belum bisa meningkatkan daya keluaran dengan maksimal dikarenakan metode ini adalah metode yang cukup sederhana dan penggunaan metode lain semisal menggunakan kecerdasan buatan untuk MPPT dapat dilakukan guna untuk memperbaiki kinerja dari MPPT.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Armaditya T.M.S. 2011. "Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Variable Speed Wind Turbine (VSWT) Dengan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) menggunakan Switch Mode Rectifier (SMR)". FTI Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- [2] Dwiyan Anugrah Ernadi, Margo Pujiyantara, Mauridhi Hery Purnomo. 2016. "Desain Maximum Power Point Tracking Untuk Turbin Angin Menggunakan Modified Perturb & Observe (P&O) Berdasarkan Prediksi Kecepatan Angin". FTI Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya.
- [3] Kalmin Akhmad. 2012. "Simulasi Dan Verifikasi Modul Surya Terhubung Dengan Boost Converter Pada Jaringan Listrik Mikro Arus Searah Dengan Menggunakan Matlab Simulink". Universitas Indonesia. Depok.
- [4] Prilian Eviningsih, Rachma. 2017. "Pengaturan Konverter Bidirectional Dengan MPPT Berbasis Modified Perturbation And Observation Pada Sistem Turbin Angin". FTI Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- [5] Rais Mushthafa, Dzulfikar. 2012. "Optimasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Maximum Power Point Tracker (MPPT) dengan Metode Gradient

Approximation". FTI Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.

- [6] Wei Tong. 2010. "*Wind Power Generation and Wind Turbine Design*", *First Edition*, WTT Pres. Southampton, UK.
- [7] Z.Chen, F.Blaabjerg. 2009. "*Wind farm-A power source in future power systems*". *Elsevier Renewabe and Sustainable Energy Reviews* 13, 1288-1300.

