

## **Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Buck-Boost Converter**

Muhamad Otong<sup>1</sup>, Rifai Mardanie Bajuri<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> muhamadotonguntirta@yahoo.com, <sup>2</sup>mardaniekamil@yahoo.com

Jurusan Teknik Elektro Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Banten  
Jalan Raya Jakarta KM. 04, Kec. Serang, Banten

**Abstrak** - Pada makalah penelitian ini, *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) diimplementasikan menggunakan *Buck-Boost Converter*. Algoritma MPPT *Perturb and Observe* (P&O) digunakan untuk mencari nilai daya maksimum pada pembangkit listrik tenaga angin untuk pengisian (*charging*) ke baterai.. Model yang digunakan pada penelitian ini adalah *Variable Speed Wind Turbine* (VSWT) dengan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Analisa, desain, dan pemodelan pada sistem konversi energi angin ini telah diselesaikan menggunakan MATLAB/Simulink. Hasil simulasi menunjukkan bahwa MPPT yang diusulkan menghasilkan daya keluaran yang lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa MPPT saat pengujian berbeban. Rata-rata efisiensi daya yang mampu ditransfer ke baterai oleh sistem yang diusulkan adalah 90,15%.

**Kata Kunci:** *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), *Perturb and Observe* (P&O), *Variable Speed Wind Turbine* (VSWT), *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), MATLAB/Simulink.

**Abstract** - *In this paper, the implementation of the Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique is developed using buck-boost converter. Perturb and observe (P&O) MPPT algorithm is used to searching maximum power from the wind power plant for charging of the battery. The model used in this study is the Variable Speed Wind Turbine (VSWT) with a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). Analysis, design, and modeling of wind energy conversion system has done using MATLAB/simulink. The simulation results show that the proposed MPPT produce a higher output power than the system without MPPT. The average efficiency that can be achieved by the proposed system to transfer the maximum power into battery is 90.56%.*

**Kata Kunci:** *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), *Perturb and Observe* (P&O), *Variable Speed Wind Turbine* (VSWT), *permanent magnet synchronous generator* (PMSG), MATLAB/Simulink..

### I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik bagi umat manusia saat ini memiliki peranan yang sangat penting. Seiring dengan hal itu maka kebutuhan akan energi listrik menjadi semakin meningkat. Dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik maka dibutuhkan pula sumber energi listrik yang memadai. Selama ini sumber energi utama yang dikonversi menjadi energi listrik berasal dari sumber energi fosil. Sedangkan cadangan bahan bakar fosil yang ada di bumi semakin menipis dan menyumbang pengaruh buruk pada lingkungan. Sehingga dibutuhkan sumber energi terbarukan yang dapat menggantikan secara perlahan ketergantungan terhadap sumber energi fosil dan tersedia dalam jumlah melimpah, murah, dan ramah terhadap lingkungan. Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang ada di Indonesia, Hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pada 120 lokasi menunjukkan, beberapa wilayah memiliki kecepatan angin di atas 5 m/s, diantaranya adalah Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa [1]. Hasil studi potensi energi angin yang dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru Terbarukan, dan Konservasi Energi (P3TKEBTKE) menyatakan bahwa perkiraan total daya yang dapat dibangkitkan oleh energi

angin yang ada di seluruh Indonesia mencapai 61.972 MW [2].

Energi angin saat ini belum mendapatkan perhatian cukup di Indonesia. Salah satu faktor penghambat dari pemanfaatan energi angin menjadi energi listrik adalah kurang optimalnya rancangan sistem pembangkitan listrik tenaga angin yang disebabkan oleh kecepatan angin di Indonesia relatif berubah dengan cepat sedangkan daya yang dapat diserap oleh pembangkit listrik tenaga angin responnya relatif lambat. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, beberapa penelitian sudah dan telah dilakukan. Secara umum, berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, untuk mengoptimalkan daya keluaran dari turbin angin, sistem pembangkit listrik tenaga angin perlu dilengkapi dengan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Terdapat bermacam-macam metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan titik operasi maksimum dari sistem turbin angin, diantaranya adalah kendali *tip speed ratio* (TSR), kendali *power signal feedback* (PSF), *hill climbing search* (HCS), *gradient approximation*, dan sebagainya [3].

Algoritma MPPT ini diimplementasikan pada suatu rangkaian DC-DC *converter* yang berfungsi sebagai rangkaian pengendali titik kerja *wind turbine*. Ada beberapa jenis rangkaian DC-DC *converter*, seperti *Boost Converter*, *Buck Converter*, *Buck-Boost Converter*, dan

*Cuk Converter*. Tiap jenis *converter* memiliki fungsi dan karakteristik masing-masing [4]. Sistem *buck-boost converter* merupakan suatu rangkaian elektronika yang dapat menjawab kebutuhan akan sebuah sumber tegangan searah dengan tegangan keluaran yang variabel. Dengan sistem *buck-boost converter*, nilai tegangan keluaran dapat diatur untuk lebih besar maupun lebih kecil dari nilai tegangan masukannya dengan mengatur besar lebar pulsa (*duty cycle*) dari PWM (*Pulse Width Modulation*) [5].

Selain itu, baterai dengan kapasitas yang sesuai dengan sistem turbin angin yang dirancang sangat dibutuhkan untuk menyimpan energi listrik pada baterai dalam bentuk elektrokimia. Pada proses penyimpanan energi tersebut, perlu adanya sistem kontrol yang berfungsi untuk mengatur pengisian baterai agar tidak terjadi pengisian berlebih pada baterai (*overcharging*), arus balik dari baterai ke sumber (pembangkit) dan tegangan pengisian berlebih yang dapat menyebabkan kerusakan pada baterai dan memperpendek umur pemakaian baterai (*battery life*).

Beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk mencari titik daya maksimum pada turbin angin diantaranya yaitu penelitian dari Iwa Kartiwa tentang Analisis Optimasi Daya Generator Turbin Angin Skala Kecil Dengan Metode Penelusuran Titik Daya Maksimum Untuk Aplikasi Pengisian Baterai dilakukan dengan mengontrol siklus kerja konverter DC berkaitan dengan *rpm* terukur, feedback tegangan bus DC. Penyimpangan (galat) antara tegangan DC bus yang diminta dengan tegangan bus DC aktual dapat digunakan untuk mengontrol siklus kerja konverter DC dengan hasil nilai  $C_p$  yang optimal dan tegangan DC yang konstan [6]. Selain itu, penelitian lainnya yang telah dilakukan oleh Novitasari, Dedy Kurnia Setiawan, dan Triwahju Hardianto tentang Optimalisasi Daya Output Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan *Permanent Magnet Synchronous Generator* Berbasis *Neural Network*. Metode yang digunakan untuk mencari titik daya maksimum dari PMSG adalah dengan memasukkan nilai tegangan *buckboost* dan nilai tegangan referensinya untuk kemudian di proses menggunakan *Neural Network* sehingga di peroleh sinyal PWM untuk

mengatur *duty cycle* yang diinginkan dan tegangan *buck-boost* yang maksimal [7].

Berdasarkan uraian dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dan latar belakang masalah yang sudah dijabarkan diatas, maka dalam penelitian simulasi sistem pembangkit listrik tenaga angin ini difokuskan untuk mencari titik daya maksimum menggunakan metode *Perturb and Observe* pada aplikasi *Buck-Boost Converter* untuk *Battery Control Regulator* berbantuan *software* MATLAB Simulink.

## II. METODOLOGI PENELITIAN

### Pemodelan Sistem Konversi Energi Angin

SKEA menghasilkan listrik dengan menggunakan kekuatan angin untuk menggerakkan sebuah generator listrik. Prosesnya yaitu rotor turbin angin menangkap gerakan tenaga angin dengan blades yang berputar dan mengubahnya menjadi energi mekanik, yang akan menggerakkan rotor generator. Generator ini kemudian mengubah tenaga mekanik menjadi tenaga listrik [8].

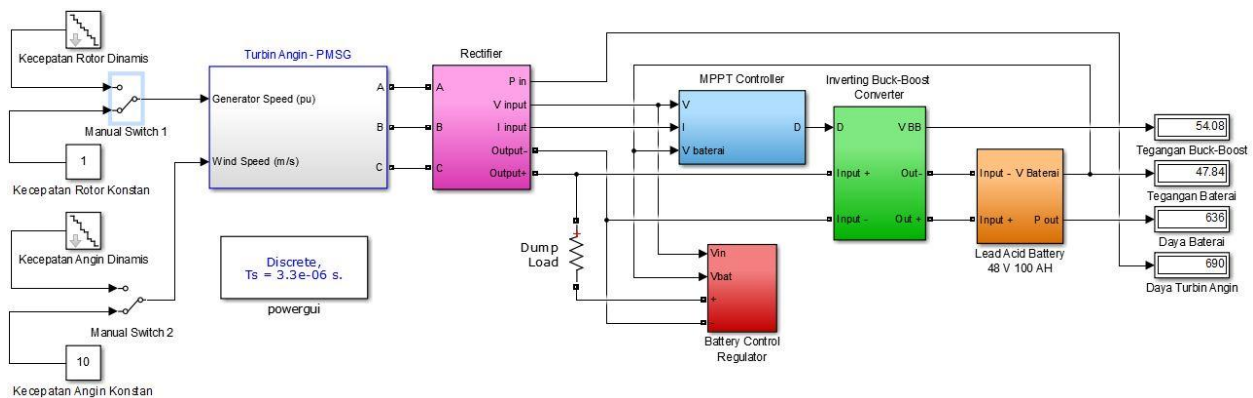
Pada penelitian ini, *input* dari blok turbin angin adalah kecepatan angin, *pitch angle*, dan kecepatan generator. Dimana *pitch angle* selalu bernilai tetap dan kecepatan generator diatur mengikuti karakteristik dari turbin angin. Pada penelitian ini, pemodelan sistem pembangkit listrik tenaga angin secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.

### Pemodelan Turbin Angin - PMSG

Prinsip dasar kerja turbin angin adalah merubah energi kinetik dari angin menjadi energi putar pada kincir, lalu putaran kincir digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya menghasilkan listrik. Turbin angin yang ideal adalah turbin angin yang dapat memanfaatkan kecepatan angin yang berubah-ubah baik kecepatan angin tinggi maupun kecepatan angin rendah. Konversi energi dari kecepatan angin ke daya mekanik ( $P_m$ ) dan produksi torka ( $T_m$ ) dapat digambarkan melalui persamaan berikut [6]:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 V^3 \tag{1}$$

$$T_m = \frac{1}{2} C_T \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 V^2 \tag{2}$$



Gambar 1. Pemodelan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Secara Keseluruhan.

Dimana:

$C_p$  : Koefisien daya

$C_T$  : Koefisien torka

$\rho$  : Kerapatan udara ( $kg/m^3$ )

$\pi \cdot R^2$  : Area sapuan rotor turbin angin ( $m^2$ )

$v$  : Kecepatan angin (m/s)

Adapun spesifikasi data parameter yang dimasukkan ke dalam blok model turbin angin ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter Turbin Angin

| No. | Turbin Angin                   |            |
|-----|--------------------------------|------------|
| 1.  | <i>Mechanical Power Output</i> | 900 W      |
| 2.  | Daya dasar                     | 900/0.9 VA |
| 3.  | Kecepatan angin dasar          | 12 m/s     |
| 4.  | Daya nominal mekanik           | 0.73 pu    |
| 5.  | Kecepatan dasar rotor          | 1.2 pu     |
| 6.  | <i>Pitch angle</i>             | 0 Deg      |

Sedangkan parameter *permanent magnet synchronous machine* (PMSG) yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Parameter PMSG [9].

| No. | <i>Permanent Magnet Synchronous Machine</i>      |                             |
|-----|--|-----------------------------|
| 1.  | Input mekanik                                    | Torsi $T_m$                 |
| 2.  | <i>Number of Poles</i>                           | 4                           |
| 3.  | <i>Stator Resistance</i>                         | 4.3 $\Omega$                |
| 4.  | <i>Mutual Inductance d-Axis <math>L_d</math></i> | 0.027 H                     |
| 5.  | <i>Mutual Inductance q-Axis <math>L_q</math></i> | 0.067 H                     |
| 6.  | <i>Permanent Magnet Flux</i>                     | 0.272 Wb                    |
| 7.  | <i>Generator Inertia</i>                         | 0.000179 Kg. m <sup>2</sup> |

**Pemodelan *Buck-boost Converter***

Tegangan keluaran dari turbin angin akan disearahkan terlebih dahulu oleh *rectifier* tak terkontrol sebelum dihubungkan dengan *Buck-boost converter*. *Buck-boost converter* berfungsi untuk mengubah level tegangan DC, baik ke level yang lebih tinggi maupun ke level yang lebih rendah. Namun, *buck-boost converter* mengubah polaritas dari tegangan *output* terhadap tegangan *input* [5]. Besar dan kecilnya nilai tegangan *output* diatur berdasarkan *duty cycle* (D) PWM pada *switch*

$$V_o = -V_s \left( \frac{D}{1-D} \right) \tag{3}$$

Untuk menentukan setiap komponen yang digunakan pada *buck-boost converter* maka diperlukan perhitungan dan parameter yang ditetapkan agar sistem dapat berjalan dengan baik. Persamaan (4) dan (5) dapat digunakan untuk menghitung besar nilai induktor dan kapasitor yang digunakan pada *buck-boost converter*. Pada penelitian ini *buck-boost converter* bekerja pada mode *Continuous Current Mode* (CCM), maka didapat nilai  $L_{min}$  dan  $C_{min}$  sebesar 0,003 H dan 0,0032 F.

$$L_{min} = \frac{R_{Lmax}(1-D_{min})^2}{2f_s} \tag{4}$$

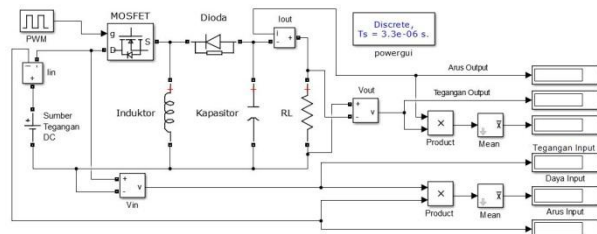
$$C_{min} = \frac{V_o D_{max}}{\Delta V_o R_{Lmin} f_s} \tag{5}$$

Parameter perancangan *buck-boost converter* ditunjukkan pada tabel 3 dibawah ini:

Tabel 3. Parameter Perancangan *buck-boost converter*.

| No. | Variabel                                       | Nilai |
|-----|--|-------|
| 1.  | Tegangan <i>Input</i> Maksimum ( $V_{Smaks}$ ) | 400V  |
| 2.  | Tegangan <i>Input</i> Minimum ( $V_{Smin}$ )   | 12V   |
| 3.  | Tegangan <i>Output</i> ( $V_o$ )               | 50V   |
| 4.  | Arus Keluaran ( $I_o$ )                        | 10A   |
| 5.  | Frekuensi <i>Switching</i>                     | 5kHz  |
| 6.  | <i>Ripple</i> Tegangan $\Delta V_o$            | 1%    |

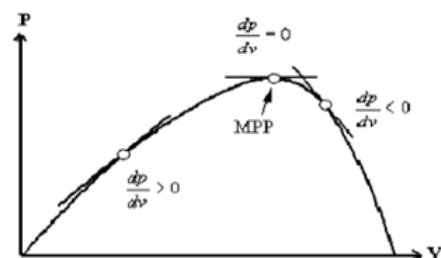
Sedangkan pemodelan *buck-boost converter* dapat ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan *Buck-boost Converter*

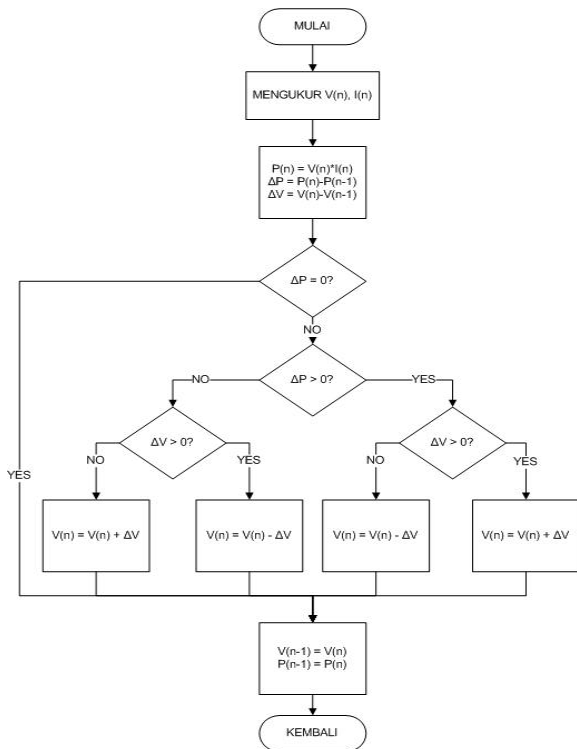
**Maximum Power Point Tracking (MPPT)**

*Maksimum Power Point Tracker* (MPPT) adalah suatu metode yang digunakan untuk mengoptimalkan daya keluaran berbagai pembangkit listrik. Pada pembangkit listrik tenaga angin, MPPT biasa digunakan untuk mengoptimalkan daya keluaran dari generator dengan menggunakan konverter daya elektronik [10]. Pada penelitian ini MPPT yang digunakan adalah *Perturbation and Observation* (P&O) *Control*. Pada pengaplikasian metode ini dibutuhkan dua parameter inti yaitu tegangan *input*  $V(n)$  dan arus *input*  $I(n)$  dari *wind turbine* sehingga dapat diketahui daya turbin angin  $P(n)$  dengan mengalikan dua parameter tersebut. Tujuan utama algoritma ini adalah untuk menjaga agar titik operasi selalu berada pada  $P_{max}$  untuk setiap kecepatan angin. Titik operasi bisa berada pada daerah kemiringan positif (sebelah kiri titik maksimum  $P_{max}$ ), kemiringan nol (titik  $P_{max}$  ditemukan), dan kemiringan negatif (sebelah kanan  $P_{max}$ ).



Gambar 3. Kemungkinan Perubahan Titik Operasi.

Jika titik operasi berada pada daerah kemiringan positif maka pengontrol harus memindahkan titik operasi ke kanan mendekati titik maksimum pada titik kemiringan nol. Dan sebaliknya jika titik operasi berada di daerah kemiringan negatif maka pengontrol harus memindahkan titik operasi ke sebelah kiri mendekati titik maksimum pada titik kemiringan nol [6].



Gambar 4. Flowchart Algoritma Perturb and Observe.

**Battery Control Regulator (BCR)**

Pada dasarnya charger adalah suatu alat yang digunakan sebagai pengisi ulang baterai atau tempat penyimpanan energi lainnya dengan melawan arus listriknya. Seiring dengan kemajuan teknologi maka ditambahkan pengatur atau controller pada charger tersebut. Kegunaan dari charger controller adalah untuk mengatur energi yang masuk ke dalam baterai mencegah dari overcharging apabila baterai telah penuh, overvoltage, dan hal-hal lain yang dapat mengurangi umur baterai [11].

Oleh karena itu, dibutuhkan Battery Control Regulator untuk mengatur proses pengisian baterai yang bersumber dari daya keluaran sistem turbin angin. Baterai yang digunakan berjenis Lead Acid 48V 100Ah. Pada penelitian ini, sistem turbin angin yang dirancang menggunakan Dump Load Resistor untuk memproteksi tegangan maksimum dari turbin angin dan tegangan baterai saat pengisian hampir penuh. Fungsi utamanya yaitu untuk menyerap daya dari turbin angin saat tegangan melebihi batas dan memperlambat kecepatan dari generator. Selain itu, ditambahkan dioda pada keluaran buck-boost converter yang dipasang secara seri dengan baterai. Dioda berfungsi untuk menghalangi arus yang keluar dari baterai ke sumber saat sumber tidak menghasilkan energi listrik.

**III. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**A. Pengujian Buck-boost Converter**

Pengujian dilakukan dengan menentukan tegangan referensi (Set Point) sebesar 50V dan tegangan masukan yang bervariasi. Besar duty cycle dihitung berdasarkan persamaan (3). Sedangkan hasil simulasi dari pengujian buck-boost converter ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Simulasi Buck-boost Converter

| Vin (V) | Duty Cycle | Vout (V) | Pin (Watt) | Pout (Watt) | Efisiensi (%) |
|---------|------------|----------|------------|-------------|---------------|
| 400     | 0.11       | 48.9     | 530        | 483         | 91            |
| 200     | 0.2        | 49.1     | 510        | 483         | 94.7          |
| 100     | 0.5        | 99.1     | 1993       | 1950        | 97.8          |
| 25      | 0.66       | 47.3     | 460        | 445         | 96.7          |
| 12      | 0.8        | 47.2     | 469        | 441         | 94            |

Dari hasil pengujian diatas, buck-boost converter dapat bekerja dan berfungsi dengan baik. Tegangan keluaran dari buck-boost converter dapat dinaikkan dan diturunkan mendekati nilai tegangan referensinya (set point) dengan mengatur besar duty cycle. Efisiensi dari buck-boost converter juga ditampilkan pada hasil pengujian. Idealnya buck-boost converter memiliki daya keluaran yang sama dengan daya masukan, namun setiap komponen buck-boost converter itu sendiri memiliki rugi-rugi yang menyebabkan efisiensinya berkurang. Pada pengujian dengan memberikan tegangan masukan maksimal buck-boost converter yaitu 400V dan duty cycle 0.8, besar efisiensinya merupakan yang paling kecil 91%. Hal tersebut dikarenakan induktor mengalami saturasi dan mulai bergetar sehingga menyebabkan tegangan dan arus keluaran tidak stabil.

**B. Pengujian Implementasi MPPT P&O**

Pada penelitian ini, untuk mengetahui hasil implementasi algoritma MPPT Perturb and Observe pada daya keluaran sistem turbin angin dilakukan pengujian dengan memberikan kecepatan angin dan beban yang bervariasi. Simulasi ini dilakukan dengan menghubungkan turbin angin dengan hambatan yang nilainya berubah dari 25 ohm sampai 100 ohm. Pengujian dan analisis dilakukan pada enam laju angin, yaitu 3.5m/s, 4.5m/s, 5.5m/s, 7m/s, 8.5m/s, dan 10m/s. Berikut adalah hasil simulasi yang didapatkan

Tabel 5. Daya Beban saat Kecepatan Angin 3,5 m/s.

| R (Ω) | Tanpa MPPT |      |      | Dengan MPPT |      |       |
|-------|------------|------|------|-------------|------|-------|
|       | V(V)       | I(A) | P(W) | V(V)        | I(A) | P(W)  |
| 25    | 7.80       | 0.31 | 2.03 | 16.91       | 0.31 | 5.4   |
| 50    | 15.76      | 0.31 | 4.88 | 23.64       | 0.31 | 7.5   |
| 75    | 23.01      | 0.30 | 6.90 | 28.77       | 0.31 | 9.10  |
| 100   | 29.56      | 0.29 | 8.57 | 33.06       | 0.31 | 10.46 |

Tabel 6. Daya Beban saat Kecepatan Angin 4,5 m/s.

| R (Ω) | Tanpa MPPT |      |       | Dengan MPPT |      |       |
|-------|------------|------|-------|-------------|------|-------|
|       | V(V)       | I(A) | P(W)  | V(V)        | I(A) | P(W)  |
| 25    | 10.21      | 0.40 | 4.66  | 26.09       | 0.48 | 12.74 |
| 50    | 21.04      | 0.42 | 9.28  | 36.37       | 0.48 | 17.69 |
| 75    | 35.2       | 0.46 | 13.99 | 44.22       | 0.48 | 21.44 |
| 100   | 42.37      | 0.42 | 18.91 | 50.78       | 0.48 | 24.61 |

Tabel 7. Daya Beban saat Kecepatan Angin 5,5 m/s.

| R (Ω) | Tanpa MPPT |      |       | Dengan MPPT |      |       |
|-------|------------|------|-------|-------------|------|-------|
|       | V(V)       | I(A) | P(W)  | V(V)        | I(A) | P(W)  |
| 25    | 14.42      | 0.57 | 8.2   | 32.44       | 0.60 | 19.67 |
| 50    | 26.72      | 0.52 | 13.97 | 45.19       | 0.60 | 27.22 |
| 75    | 43.49      | 0.50 | 21.8  | 54.92       | 0.60 | 33.03 |
| 100   | 56.53      | 0.51 | 29.29 | 63.06       | 0.60 | 37.86 |

Tabel 8. Daya Beban saat Kecepatan Angin 7 m/s.

| R<br>(Ω) | Tanpa MPPT |      |       | Dengan MPPT |      |       |
|----------|------------|------|-------|-------------|------|-------|
|          | V(V)       | I(A) | P(W)  | V(V)        | I(A) | P(W)  |
| 25       | 28.69      | 1.02 | 29.27 | 64.76       | 1.20 | 77.91 |
| 50       | 52.40      | 1.10 | 57.65 | 90.13       | 1.19 | 107.8 |
| 75       | 76.85      | 1.14 | 87.62 | 109.5       | 1.19 | 130.8 |
| 100      | 100.3      | 1.16 | 116.4 | 125.7       | 1.19 | 149.9 |

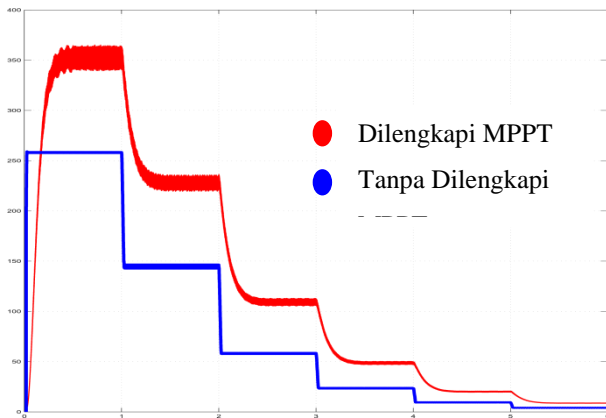
Tabel 9. Daya Beban saat Kecepatan Angin 8,5 m/s.

| R<br>(Ω) | Tanpa MPPT |      |       | Dengan MPPT |      |       |
|----------|------------|------|-------|-------------|------|-------|
|          | V(V)       | I(A) | P(W)  | V(V)        | I(A) | P(W)  |
| 25       | 44.82      | 1.60 | 71.77 | 99.6        | 1.84 | 183.8 |
| 50       | 87.66      | 1.63 | 142.9 | 139.1       | 1.84 | 256.3 |
| 75       | 136.7      | 1.58 | 216.4 | 169.2       | 1.84 | 311.5 |
| 100      | 161.45     | 1.79 | 289   | 194.3       | 1.84 | 357.6 |

Tabel 10. Daya Beban saat Kecepatan Angin 10 m/s.

| R<br>(Ω) | Tanpa MPPT |      |       | Dengan MPPT |      |       |
|----------|------------|------|-------|-------------|------|-------|
|          | V(V)       | I(A) | P(W)  | V(V)        | I(A) | P(W)  |
| 25       | 59.15      | 2.16 | 128.2 | 127.6       | 2.36 | 301.5 |
| 50       | 111.37     | 2.32 | 258.4 | 178.4       | 2.36 | 421.6 |
| 75       | 160.12     | 2.39 | 383   | 217.1       | 2.36 | 513.4 |
| 100      | 228.31     | 2.20 | 502.3 | 249.5       | 2.36 | 589.9 |

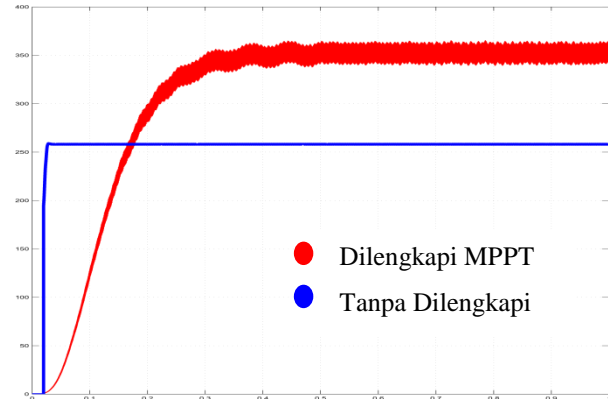
Dari data hasil pengujian daya beban pada tabel diatas dapat dilihat bahwa kecepatan angin yang berbeda maka didapatkan daya yang berbeda pula. Daya beban naik dan turun sesuai dengan pertambahan beban. Semakin besar kecepatan angin maka daya yang di dapat juga semakin besar sesuai dengan persamaan (1). Dari data hasil pengujian diatas ditampilkan dalam bentuk grafik untuk membandingkan dan menganalisa daya keluaran pada setiap kecepatan angin mulai dari 10 m/s sampai 3,5 m/s dengan beban 50 ohm. Berikut adalah grafik perbandingan daya maksimum sistem turbin angin yang dilengkapi *Maximum Power Point Tracker* dengan algoritma *Perturb and Observe* dan sistem turbin angin yang tidak dilengkapi dengan MPPT:



Gambar 5. Perbandingan Daya Maksimum dengan Beban 50 Ohm.

Pencarian titik daya maksimum dengan algoritma *Perturb and Observe* mampu menghasilkan daya keluaran yang lebih besar dibandingkan dengan sistem turbin angin tanpa dilengkapi MPPT pada setiap kecepatan angin. Hal ini membuktikan bahwa perubahan titik kerja tegangan referensi untuk mencari daya maksimum pada setiap kecepatan angin dapat bekerja dengan baik.

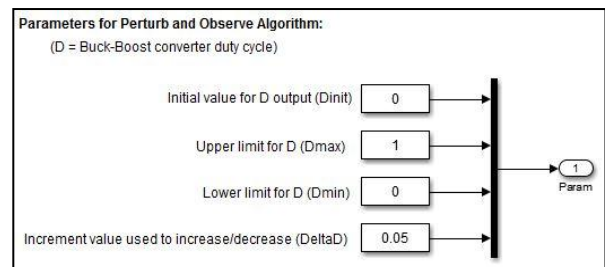
Tetapi, karena prinsip kerja dari algoritma *Perturb and Observe* ini selalu melakukan gangguan (*perturb*) untuk menemukan titik puncak, maka tegangan keluaran yang dihasilkan berosilasi. Sedangkan tegangan keluaran pada sistem turbin angin tanpa dilengkapi *Maximum Power Point Tracker* selalu konstan karena tidak ada proses *switching* dan perubahan titik kerja pada tegangan yang dihasilkan. Untuk melihat perbedaan tegangan keluaran yang dihasilkan pada kedua sistem yang diujikan dapat dilihat pada Gambar 6 dibawah ini:



Gambar 6. Tegangan Keluaran saat Beban 50 Ohm.

Selain itu, untuk mencapai keadaan yang stabil pada sistem turbin angin dilengkapi MPPT, waktu yang dibutuhkan sedikit lebih lama dibandingkan sistem turbin angin tanpa dilengkapi MPPT. Dapat dilihat sistem dengan dilengkapi *Maximum Power Point Tracker* baru mencapai keadaan stabil saat 0.5 detik sedangkan sistem tanpa dilengkapi MPPT kurang dari 0.1 detik. Hal ini dikarenakan adanya perubahan titik kerja (*perturb*) pada tegangan sumber yang berulang-ulang (*looping*) guna mencari daya maksimum pada turbin angin sehingga membutuhkan waktu yang sedikit lebih lama dibanding sistem turbin angin tanpa dilengkapi MPPT.

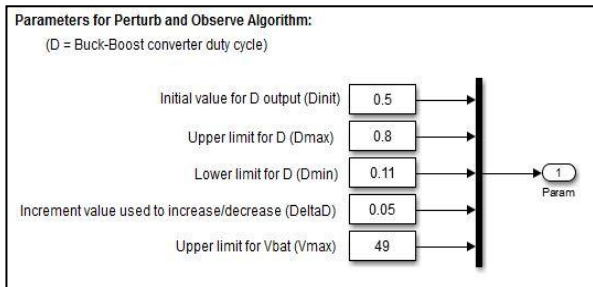
Perubahan titik kerja ini dimulai saat *duty cycle* bernilai 0 atau saat MOSFET berada pada kondisi OFF. Penambahan atau pengurangan *duty cycle* berdasarkan pada perubahan titik kerja tegangan referensi sebesar 0.05 dengan rentang batas minimal dan batas maksimal *duty cycle* yaitu 0 sampai 1. Gambar 7 dibawah ini menunjukkan parameter yang digunakan pada sistem yang dilengkapi *Maximum Power Point Tracker* (MPPT):



Gambar 7. Parameter untuk Pengujian MPPT.

Setelah melakukan simulasi dan didapat data hasil pengujian, maka untuk mengetahui keandalan sistem yang telah dirancang dan dibuat dilakukan perhitungan efisiensi daya yang mampu disimpan pada baterai dari turbin angin dengan implementasi algoritma MPPT *Perturb and Observe* menggunakan *buck-boost converter*

saat kecepatan angin berubah-ubah. Berikut parameter dari sistem yang telah dibuat:



Gambar 8. Parameter untuk Pengujian MPPT pada Aplikasi Pengisian Baterai.

Parameter yang digunakan pada pengujian ini berbeda dengan parameter yang digunakan saat pengujian berbeban. Untuk mempercepat respon pelacakan titik daya maksimum maka, perubahan titik kerja dimulai saat *duty cycle* bernilai 0.5. Artinya pada saat *duty cycle* yang diberikan adalah 0,5 maka, tegangan masukan *buck-boost converter* ( $V_{in}$ ) sama dengan tegangan keluarannya ( $V_{out}$ ). Selain itu, rentang batas minimal dan batas maksimal *duty cycle* sebesar 0,11 sampai 0,8. Batas *duty cycle* tersebut mengacu pada perhitungan *duty cycle* yang diinginkan sistem sesuai dengan perhitungan pada bab sebelumnya.

Pada simulasi ini dilakukan pengujian dengan menggabungkan semua komponen dari pembangkit listrik tenaga angin, yakni turbin angin, generator, *rectifier*, *buck-boost converter*, MPPT Controller, *Battery Control Regulator* dengan pemasangan baterai berjenis *Lead Acid* 48V 100Ah dengan *state of charge* sebesar 50% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 diatas. Hasil dari pengujian dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik tenaga angin tanpa dilengkapi *Maximum Power Point Tracker* (MPPT). Besar *duty cycle* yang diberikan pada sistem tanpa dilengkapi MPPT dilakukan secara manual dengan mencari hasil nilai efisiensi yang paling tinggi pada setiap kecepatan angin yang berbeda-beda. Berikut tabel hasil perbandingan efisiensi daya dari pengujian sistem yang telah dilakukan:

Tabel 11. Perbandingan Efisiensi Daya Sistem dengan MPPT & Tanpa MPPT.

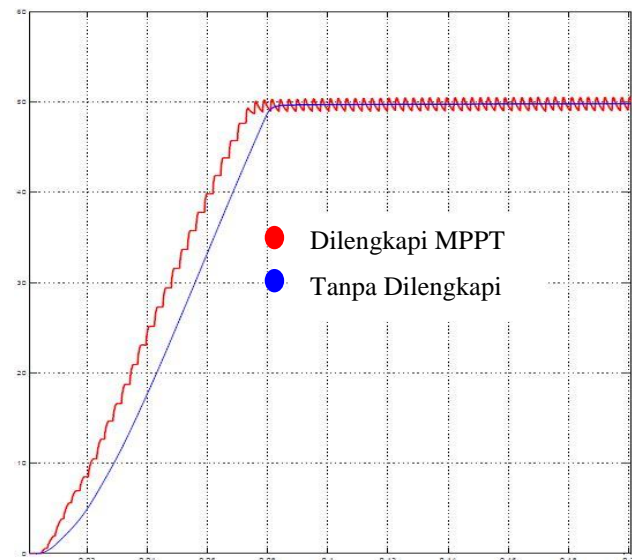
| Wind Speed | Daya Masukan (Watt) |       | Daya Keluaran (Watt) |       | Efisiensi (%) |       |
|------------|---------------------|-------|----------------------|-------|---------------|-------|
|            | Tanpa MPPT          | MPPT  | Tanpa MPPT           | MPP T | Tanpa MPPT    | MPPT  |
| 3.5 m/s    | 11.54               | 18.76 | 8.62                 | 19.75 | 74.69         | 95    |
| 4.5 m/s    | 29.18               | 32.24 | 24.08                | 29.65 | 82.75         | 91.96 |
| 5.5 m/s    | 77.67               | 80.84 | 66.67                | 74.36 | 85.83         | 91.98 |
| 7 m/s      | 235.3               | 216.7 | 202                  | 197.7 | 85.84         | 91.23 |
| 8.5 m/s    | 590                 | 500   | 480.5                | 430.4 | 81.44         | 86.08 |

|                     |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10 m/s              | 601.7 | 617.6 | 490.7 | 522.8 | 81.55 | 84.65 |
| EFISIENSI RATA-RATA |       |       |       |       | 82.01 | 90.15 |

Secara keseluruhan efisiensi sistem pembangkit listrik yang dilengkapi *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) lebih besar dibandingkan sistem tanpa dilengkapi MPPT. Besar efisiensi rata-rata menunjukkan daya yang mampu ditransfer dari pembangkit ke baterai sebesar 90,56% untuk sistem dengan *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) dan 82,01% untuk sistem tanpa dilengkapi MPPT. Namun, pada kecepatan angin diatas 6 m/s sistem pembangkit listrik tenaga angin yang dilengkapi *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) tidak mampu menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan sistem yang tidak dilengkapi MPPT.

Penulis menganalisa bahwa, hal tersebut dapat terjadi karena pada kecepatan angin tinggi perubahan titik kerja pada tegangan referensi untuk mencari titik maksimum menggunakan perubahan (penambahan atau pengurangan) *duty cycle* dengan nilai 0,05 dinilai terlalu besar. Sehingga saat *duty cycle* ditambahkan atau dikurangi, titik kerja tegangan referensi berada pada kemiringan negatif. Meskipun begitu, sistem pembangkit listrik yang dilengkapi *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) tetap memberikan nilai efisiensi yang lebih besar dibandingkan sistem yang tidak dilengkapi MPPT.

Sementara untuk tegangan keluaran dari *buck-boost converter* pada sistem pembangkit listrik tenaga angin yang dilengkapi *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) menunjukan respon yang lebih cepat dibandingkan dengan sistem tanpa MPPT. Respon ini berlaku pada setiap kecepatan angin yang berbeda-beda. Perbandingan respon tegangan pada saat kecepatan angin 3,5 m/s ditunjukkan pada Gambar 9 dibawah ini:

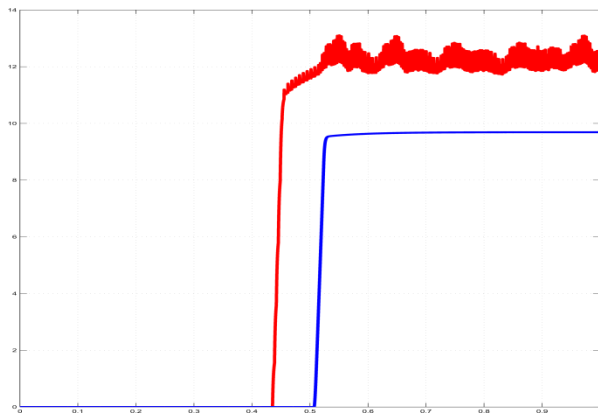


Gambar 9. Perbandingan Respon Tegangan Keluaran *Buck-boost Converter* saat Kecepatan Angin 6,5 m/s.

Pengaturan nilai awal (*initial value*) *duty cycle* menjadi 0,5 terbukti membuat *buck-boost converter* melakukan proses *switching* tegangan yang lebih cepat dibandingkan dengan *duty cycle* yang bernilai awal 0.

Seperti yang dapat dilihat pada gambar diatas, pada saat 0.42 sekon sistem yang dilengkapi *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) sudah berada pada kondisi stabil sedangkan pada saat 0.5 sekon sistem yang tidak dilengkapi MPPT baru berada pada kondisi stabil. Hal ini dikarenakan MOSFET pada *buck-boost converter* langsung berada pada kondisi ON dan memproses tegangan input yang sama dengan tegangan keluarannya tanpa harus mengukur tegangan dari sumber sehingga mengurangi waktu proses *switching*.

Sedangkan pada sistem tanpa MPPT proses *switching* tegangan tidak berjalan optimal karena nilai *duty cycle* yang diberikan bernilai konstan, sehingga mempengaruhi tegangan keluaran *buck-boost converter* yang dihasilkan dan baru mencapai daya maksimum saat tegangan dari sumber sudah mencapai maksimum pula. Besarnya daya yang mampu ditransfer ke baterai antara sistem pembangkit listrik tenaga angin yang dilengkapi *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) dengan sistem tanpa dilengkapi MPPT ditunjukkan pada gambar perbandingan daya dibawah ini:



Gambar 10. Perbandingan Daya Baterai Saat Kecepatan Angin 3,5 m/s.

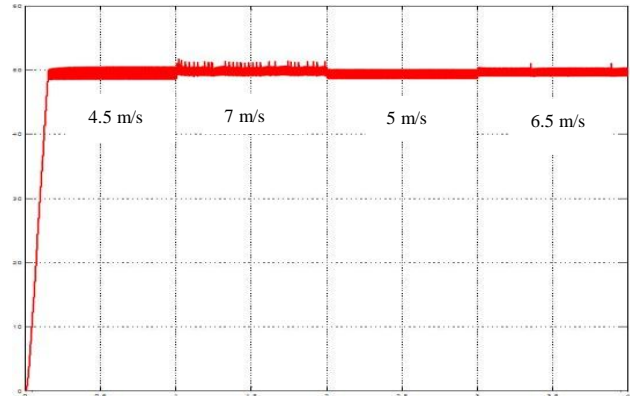
Sistem yang dilengkapi *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) dengan metode *Perturb and Observe* baru bisa melakukan proses pengisian baterai (*charging*) pada saat 0,43 sekon. Hal ini dapat terjadi karena tegangan keluaran *buck-boost converter* belum melebihi tegangan nominal pada baterai. Baterai baru dapat diisi saat tegangan sumber melebihi tegangan nominal baterai. Sedangkan sistem yang tidak dilengkapi MPPT, baterai baru dapat melakukan proses pengisian pada saat 0,51 sekon. Jika diperhatikan pada kedua gambar diatas, daya baterai memiliki kesesuaian dengan tegangan keluaran *buck-boost converter*.

C. Pengujian *Battery Control Regulator* (BCR) pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pada pengujian *Battery Control Regulator* (BCR), Tegangan keluaran *buck-boost converter* haruslah tidak terpaut jauh dari tegangan nominal baterai agar baterai tidak mengalami *overvoltage*. Untuk itu ditambahkan kontrol *Proportional Integral* (PI) untuk mengatur kerja *duty cycle* agar tegangan keluaran *buck-boost converter* tidak melebihi batas *voltage charging* dari baterai pada setiap kecepatan angin.

Pengujian lainnya yang dilakukan adalah memproteksi baterai dari *overcharging*. Pada saat kondisi

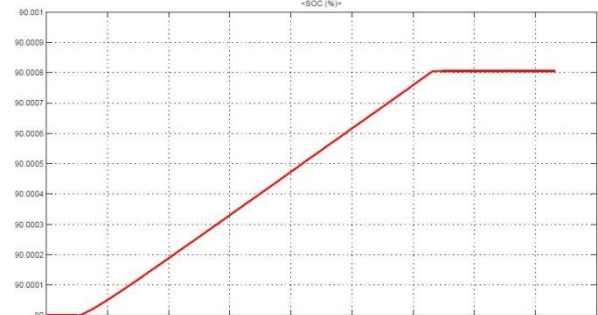
baterai mencapai batas maksimum pengisian, maka *buck-boost converter* akan berhenti melakukan *switching* sehingga baterai tetap pada kondisi terakhirnya. Agar arus yang mengalir dari baterai ke sumber saat sumber tidak bekerja dapat dicegah maka ditambahkan dioda untuk menghalangi arus tersebut. Gambar 11 memperlihatkan tegangan keluaran dari *buck-boost converter* pada saat pengisian baterai dengan *state of charge* 50%.

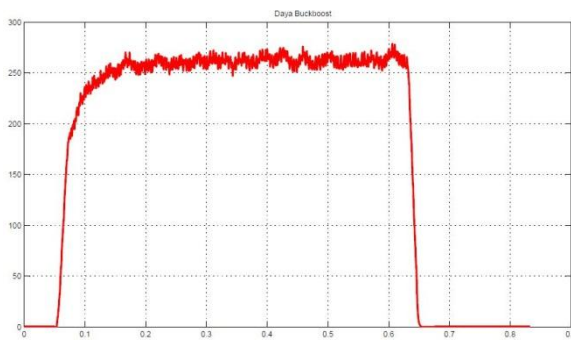


Gambar 1. Tegangan Keluaran *Buck-boost Converter*.

Kecepatan angin yang diberikan pada pengujian ini bervariasi untuk melihat perubahan tegangan pada keluaran *buck-boost converter*. Dapat dilihat pada gambar diatas bahwa tegangan masih berada pada nilai yang stabil untuk pengisian baterai pada kecepatan angin yang berubah-ubah dan fluktuatif. Kombinasi antara kontrol *Proportional Integral* (PI) dan *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) mampu menjaga tegangan keluaran *buck-boost converter* berada pada tegangan rata-rata 50V.

Pengujian terakhir yang dilakukan pada sistem adalah proteksi baterai dari *overcharging*. Pada simulasi ini tegangan maksimum baterai yang diinginkan sistem diatur sebesar 49 Volt dengan memberikan daya masukan dari sumber pembangkit tenaga angin pada kecepatan angin konstan 9 m/s. Pengisian dimulai dengan *state of charge* 90% dengan tegangan awal baterai 48.92 Volt. Seluruh proses yang telah dijelaskan diatas disimulasikan dan hasil dari simulasi ditampilkan pada gambar ini:





Gambar 13. *State of Charge* Baterai dan Daya *Buck-boost Converter* saat Baterai *Full Charging*.

Gambar diatas menjelaskan bahwa pada saat 0,65 detik baterai telah mencapai tegangan maksimum yang diatur oleh sistem. Secara otomatis MOSFET pada *buck-boost converter* menjadi OFF sehingga tidak ada daya tambahan yang diterima oleh baterai karena proses *switching* telah berhenti. Dioda pada pengujian ini bekerja dengan baik, seperti yang dilihat pada gambar SOC diatas, setelah 0,65 detik baterai tetap pada kondisi terakhirnya dan tidak mengalami pengosongan (*discharging*). Artinya, tidak ada arus yang mengalir dari baterai ke sumber saat *buck-boost* berhenti bekerja.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian simulasi pencarian daya maksimum pada turbin angin dengan metode *perturb and observe* menggunakan *buck-boost converter* untuk aplikasi *battery control regulator* dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penelitian simulasi dari sistem pembangkit listrik tenaga angin yang dilengkapi MPPT pada aplikasi *buck-boost converter* telah selesai dilakukan dan metode *Perturb and Observe* dapat diimplementasikan untuk mengekstrak daya maksimum pada setiap kecepatan angin.
2. Pada perbandingan daya keluaran sistem turbin angin menggunakan algoritma MPPT *Perturb and Observe* (P&O), diperoleh hasil daya keluaran yang lebih besar dibandingkan sistem turbin angin tanpa dilengkapi MPPT. Sedangkan berdasarkan hasil penelitian simulasi pencarian daya maksimum sistem turbin angin untuk aplikasi pengisian baterai pada *buck-boost converter* didapatkan rata-rata efisiensi 90,15% dan 82,01% untuk sistem tanpa dilengkapi MPPT.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] LAPAN. 2005. "Data Kecepatan Angin di Pulau Jawa". Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional.
- [2] Wargadalam, Verina J. (2014). "Potensi Energi Angin Dan Kelayakan Harga Listrik yang Dihasilkan". Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru Terbarukan, dan Konservasi Energi (P3TKEBTKE).

- [3] Daud, P. K. (2016). "Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) Dengan Metode *Particle Swarm Optimazation*". Teknik Elektro Univesitas Gajah Mada.
- [4] Zaini, Hamami. A. (2016). "Implementasi *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Metode *Perturb And Observe*". Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- [5] Hidayat, Suryo Mochamad. (2010). "Rancang Bangun *Buck-Boost Converter*". Universitas Indonesia.
- [6] Kartiwa, Iwa. "Analisis Optimasi Daya Generator Turbin Angin Skala Kecil Dengan Metode Penulusuran Titik Daya Maksimum Untuk Aplikasi Pengisian Baterai". Institut Teknologi Bandung.
- [7] Novitasari., Dedy Kurnia Setiawan., Triwahju Hardianto. (2014). "Optimalisasi Daya Output Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan *Permanent Magnet Synchronous Generator* Berbasis *Neural Network*". Universitas Jember.
- [8] Inderpreet Singh Wander, (2011). "*Modeling Of Synchronous Generator And Full-Scale Converter For Distribution System Load Flow Analysis*", *Master of Technology, Electrical Engineering, P. A. University, India*.
- [9] Boldea, Ion., Nasar, Syed A. (2005) *Electric Drives Second Edition Book*.
- [10] Hidayatullah, Nur Asyik., Ningrum, Hanifah Nur Kumala. (2016). "Optimalisasi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin Turbin Sumbu Horizontal dengan Menggunakan Metode *Maximum Power Point Tracker*". Politeknik Negeri Madiun.
- [11] Ardhi, Faizal Zul. (2011). "Rancang Bangun *Charge Controller* Pembangkit Listrik Tenaga Surya". Universitas Indonesia.