

# OPTIMALISASI DAYA OUTPUT SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGGUNAKAN *PERMANENT MAGNET SYNCRHONOUS GENERATOR* BERBASIS *NEURAL NETWORK*

## (OUTPUT POWER OPTIMIZATION OF WIND POWER PLANT SYSTEM USING PERMANENT MAGNET SYNCRHONOUS GENERATOR BASED NEURAL NETWORK)

Novitasari, Dedy Kurnia Setiawan, Triwahju Hardianto  
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember  
Jln. Kalimantan 37, Jember 68121  
E-mail: nophita\_0601@yahoo.co.id

### Abstrak

Kebutuhan energi listrik tidak sebanding dengan ketersediaan sumber daya energi yang mulai menipis. Dibutuhkan pengembangan teknologi dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan, salah satunya adalah energi angin. Akan tetapi pemanfaatan energi angin sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Indonesia menghadapi beberapa kendala, terutama karena rendahnya kecepatan angin rata-rata yang hanya berkisar antara 2,5 – 6 m/s. Oleh karena itu, dilakukan penelitian dengan pemodelan turbin angin yang mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah. Tugas akhir ini memodelkan pembangkit listrik tenaga angin menggunakan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) agar mampu mengoptimalkan daya dengan kecepatan angin rata-rata yang rendah dan fluktuatif. Untuk mengekstraksi daya maksimum dari angin yang berfluktuasi, diperlukan suatu pengontrolan yang baik. Kontrol *Neural Network* digunakan untuk mengendalikan daya dengan metode *Maximum Power Point Tracking* pada *buck boost converter* sehingga daya yang dihasilkan dapat optimal. Daya yang diperoleh pada beban seimbang di musim kemarau sebesar 1919 W dan pada musim penghujan sebesar 1859 W. Sedangkan pada beban tak seimbang diperoleh daya sebesar 2207 W; 683,4 W; 1068 W pada musim kemarau dan pada musim penghujan sebesar 2200 W; 680 W; 1062 W.

**Kata kunci :** Pembangkit listrik tenaga angin, *maximum power point tracking*, *neural network*.

### Abstract

*Electricity requirement is not comparable with the availability of energy resources which are depleting. There are need developing technology to use renewable energy sources, one of them is wind energy. However, the utilization of wind energy as wind power plant in Indonesia faces several obstacles, mainly due to the low average wind speed which only ranged from 2.5 to 6 m/s. Therefore, research carried by modeling wind turbine that is able to operating at low wind speeds. This final project modeling wind power plant with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) that is capable for optimizing power with average low wind speeds and fluctuate. To extract the maximum power from the wind fluctuation requiring a good control. Neural network control is used to control the power with method of maximum power point tracking on the buck boost converter so that power can be optimized. The power obtained at a balanced load in the dry season of 1919 W and in the rainy season of 1859 W. While the unbalanced load obtained a power of 2207 W; 683.4 W; 1068 W in the dry season and the rainy season of 2200 W; 680; 1062 W.*

**Keywords:** *wind power plant, maximum power point tracking, neural network.*

## PENDAHULUAN

Seiring dengan berkembangnya teknologi elektronika daya, sistem konversi energi angin (SKEA) dilakukan semaksimal mungkin untuk setiap kecepatan angin yang berubah-ubah, sistem turbin angin seperti ini dikenal dengan istilah sistem turbin angin *variable speed*. *Variable-speed* sistem konversi energi angin dapat diaplikasikan pada *Wound Rotor Induction Generator* (WRIG atau tipe 2 generator) yang memiliki resistansi rotor *variabel*, yang

dapat diubah untuk mengontrol slip, *Doubly-Fed Induction Generator* (DFIG atau tipe 3 generator) dan generator sinkron konverter skala penuh (juga disebut sebagai tipe 4 generator) [1]. Sistem *variable speed* pada skripsi ini menggunakan generator sinkron magnet permanen tipe 4 (*direct drive*).

Sistem turbin angin yang menggunakan sistem kecepatan berubah (*variable speed*) didesain agar dapat mengekstrak daya maksimum pada berbagai macam kecepatan dan dapat menghilangkan *pulsating torque* yang

umumnya timbul pada sistem *fixed speed* (tipe 1 SKEA). Selain itu, tipe 4 SKEA dapat dibuat sistem *direct-driven* tanpa menggunakan *gear box*, sehingga mengurangi biaya kebisingan, instalasi dan pemeliharaan.

Sistem pembangkit listrik tenaga angin dibutuhkan sebuah pengontrolan yang baik supaya dapat mengoptimalkan daya output turbin angin. Pengontrolan ini dapat dikendalikan menggunakan *Neural network* (NN). NN merupakan sebuah pengendali pembelajaran yang mengadopsi dari kemampuan otak manusia dimana mampu memberikan stimulasi/rangsangan, melakukan proses, dan memberikan output. NN disini digunakan untuk mengontrol *buck-boost converter* supaya dapat menghasilkan daya yang optimal.

## METODE PENELITIAN

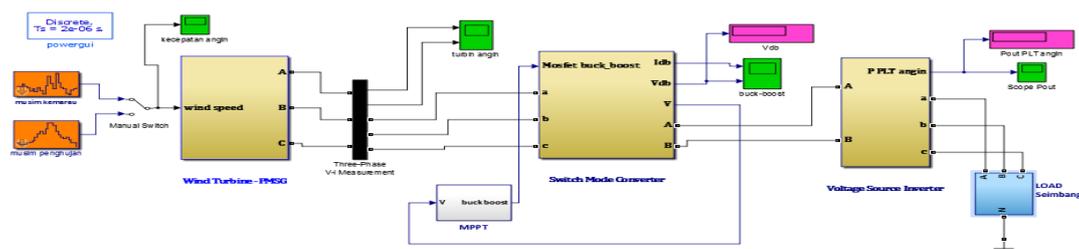
### Pemodelan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA)

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 [1].

Pada gambar 1 ditunjukkan pemodelan secara keseluruhan pada tugas akhir ini. Input dari blok *wind turbine-PMSG* adalah data kecepatan angin musim kemarau dan musim penghujan. Tegangan yang dihasilkan oleh generator berupa tegangan AC, kemudian diperbaiki oleh *rectifier* untuk menjadi tegangan DC. Selanjutnya, sebuah *buck-boost* konverter digunakan untuk menstabilkan tegangan DC dan mengontrol tegangan output generator supaya konstan. Tegangan DC dinaikkan dan diturunkan tegangannya oleh DC/DC *buck-boost converter* dengan mengendalikan *duty ratio* untuk memperoleh *regulated voltage* (tegangan output pada level tertentu) di kapasitor sehingga diperoleh pula daya output maksimum (MPPT) yang dikontrol menggunakan *neural network*. Selanjutnya untuk terhubung ke beban 3 fasa, maka menggunakan inverter untuk mengubah tegangan DC menjadi AC.

### Pemodelan Turbin Angin-PMSG

Turbin angin/kincir angin merupakan alat pengubah sumber energi alternatif (angin) yang ramah lingkungan. Berprinsip mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik (rotasi) selanjutnya digunakan sebagai penggerak generator listrik. Pada turbin angin, jumlah daya angin yang ditangkap turbin tergantung kepada ukuran baling-baling turbin dan kecepatan angin [2].



**Gambar 1.** Pemodelan sistem pembangkit listrik tenaga angin secara keseluruhan

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

**Tabel 1.** Data parameter turbin angin

No	Variabel	Keterangan
1	Daya output nominal mekanik	6 kW
2	Daya dasar	6000/0,9 VA
3	Kecepatan angin dasar	12 m/s
4	Daya nominal mekanik	0,8 pu
5	Kecepatan dasar rotor	1 pu
6	<i>Pitch angle</i>	0 Deg

Generator yang terhubung dengan turbin angin adalah generator magnet permanen dengan masukan generator yaitu torsi mekanik yang akan disuplai oleh turbin angin. Generator magnet permanen adalah jenis pembangkit listrik yang menggunakan magnet permanen sehingga tidak memerlukan tambahan eksitasi dari luar untuk membuat medan magnetnya. Desainnya yang cukup sederhana memudahkan kita dalam menentukan jumlah kutub yang diinginkan sehingga generator ini bisa digunakan untuk frekuensi tinggi maupun rendah [3].

Adapun spesifikasi data parameter dari PMSG dapat ditunjukkan pada tabel 2.

**Tabel 2.** Data parameter PMSG

No	Variabel	Keterangan
1	Tipe rotor	<i>Round</i>
2	Gelombang EMF	Sinusoidal
3	Input mekanik	<i>Torque Tm</i>
4	Resistansi stator (Rs); Induktansi stator (H)	0,425 W ; 8,35.10 <sup>-4</sup> H
5	Fluks magnetik	0,433 Wb

Dalam PMSG pada SKEA tipe 4, generator poros rotor secara langsung digabungkan ke turbin angin sehingga memiliki kecepatan mekanik ( $\omega_m$ ). Kecepatan listrik ( $\omega_e$ ), kecepatan mekanik rotor ( $\omega_m$ ), dan jumlah pasangan kutub ( $p$ ), memiliki hubungan yakni:

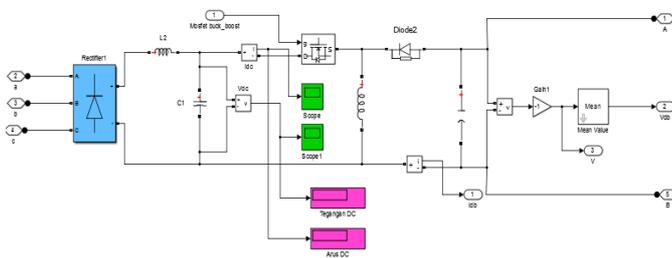
$$\omega_e = p \times \omega_m \quad (1)$$

### Pemodelan Switch Mode Converter

Switch Mode Converter terdiri dari *rectifier* dan *buck-boost converter*. Tegangan keluaran dari turbin angin akan disearahkan oleh *rectifier* tak terkontrol, kemudian dihubungkan ke DC-DC konverter. *Buck-boost converter* adalah konverter DC dimana tegangan output dapat lebih besar atau lebih kecil dari tegangan input. *Buck-boost converter* ini dapat mengubah polaritas tegangan output terhadap tegangan input [4]. Nilai tegangan keluaran dari *buck-boost converter* adalah:

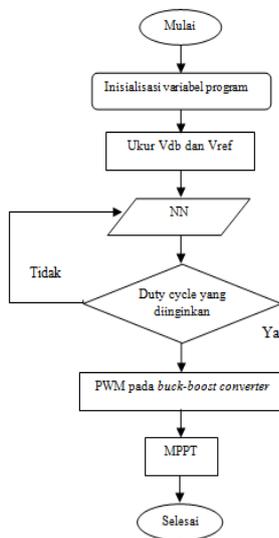
$$V_o = -V_s \times \frac{D}{(1-D)} \quad (2)$$

Pengendalian DC-DC *buck-boost converter* ini digunakan untuk menghasilkan MPPT. MPPT digunakan untuk mendapatkan nilai daya yang optimal sehingga didapat daya keluaran yang maksimal dari suatu turbin angin. Pemodelan switch mode converter dapat ditunjukkan pada gambar 2.



**Gambar 2.** Pemodelan *Switch Mode Converter*

Berikut merupakan *flowchart* teknik MPPT:



**Gambar 3.** *Flowchart* teknik MPPT

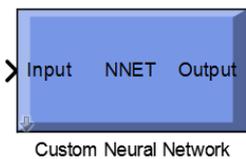
Berdasarkan gambar 3, untuk mendapatkan nilai MPPT maka harus memasukkan nilai tegangan *buck-boost converter* dan nilai tegangan referensinya. Selanjutnya, nilai tersebut akan diproses oleh *neural network* untuk memperoleh sinyal PWM (*duty ratio*) sehingga akan menghasilkan *duty cycle* yang diinginkan supaya nilai tegangan yang dihasilkan oleh *buck-boost converter* mencapai tegangan yang maksimal. Apabila tegangan yang dihasilkan oleh *buck-boost* tidak mencapai tegangan yang maksimal, maka NN akan berproses lagi untuk melakukan

pembelajaran. Tegangan yang dihasilkan oleh *buck-boost converter* harus sesuai dengan tegangan input yang diinginkan oleh inverter, supaya tegangan yang dihasilkan oleh inverter sesuai dengan tegangan *line to line* pada beban AC 3 fasa.

**Pemodelan *Neural Network***

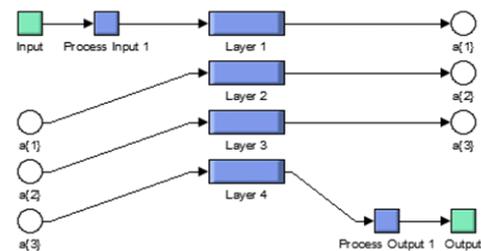
*Neural network* (jaringan saraf tiruan) adalah sistem pemrosesan informasi yang memiliki karakteristik mirip dengan jaringan saraf biologi (berdasarkan prinsip kerja yang sama dengan otak manusia) [5].

Pemodelan untuk mengontrol MPPT digunakan *Neural Network* (NN) untuk memperoleh *duty cycle* referensi yang nantinya akan mengatur proses PWM pada *buck-boost converter*. Input dari NN ini adalah *error* tegangan yang didapat dari tegangan *buck-boost converter* dengan tegangan referensi. Input ini merupakan informasi dasar yang kemudian akan digunakan pada proses NN.



**Gambar 4.** Blok sistem NN

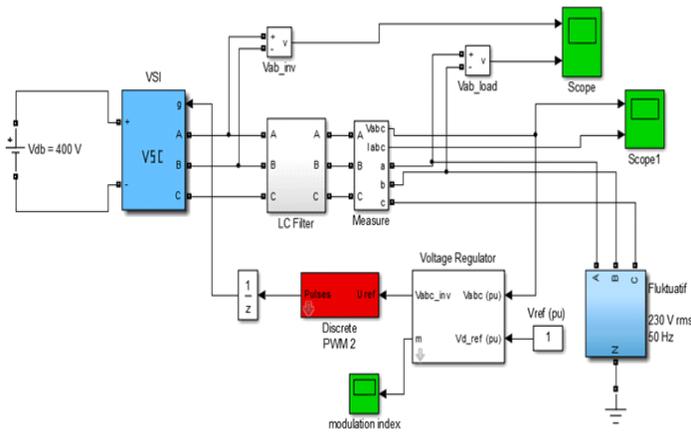
Blok sistem NN pada gambar 4 diperoleh proses pelatihan dengan merancang jumlah layer yang akan digunakan. Proses untuk memperoleh jumlah layer yang digunakan dengan cara *trial error* sampai hasil target sesuai dengan output yang diinginkan. Untuk mendapatkan Error yg minimal maka digunakan kombinasi 3 buah *hidden layer*. Layer 1 dan 2 dibuat maksimal 5 neuron, dan layer ke tiga dirancang dengan jumlah neuron maksimal 15. Dari beberapa proses training didapat nilai *error* maksimal yaitu  $1,2 \cdot 10^{-7}$  dengan konstruksi NN 5-5-10. Hal ini ditunjukkan pada gambar 5.



**Gambar 5.** Struktur jaringan NN

**Pemodelan Inverter**

Gambar 4 merupakan inverter 3 fasa yang akan digunakan pada skripsi ini dengan cara memodulasi lebar pulsa (PWM) agar inverter mampu menghasilkan sinyal sinusoidal. Keuntungan metode ini yaitu dapat mengatur amplitudo dan frekuensi keluarannya serta rendahnya distorsi harmonik pada tegangan keluaran.



**Gambar 6.** Pemodelan *voltage source inverter* (VSI)

**Pemodelan Beban**

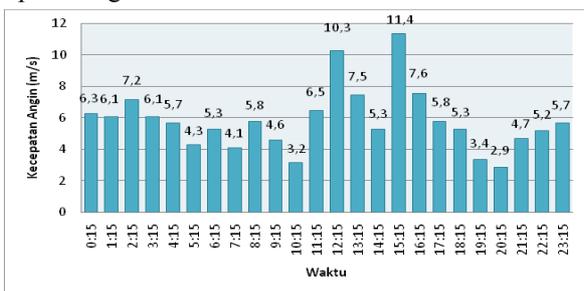
Beban yang digunakan pada skripsi ini yaitu beban tak seimbang 3 fasa dan beban seimbang 3 fasa. Pada beban tak seimbang 3 fasa memiliki daya pada setiap fasanya berbeda-beda, yaitu sebesar 2 kW pada fasa A, 0,5 kW pada fasa B, dan 1 kW pada fasa C, sehingga daya totalnya sebesar 3,5 kW. Sedangkan pada beban seimbang memiliki daya sebesar 1,5 kW pada masing-masing fasanya, sehingga totalnya sebesar 4,5 kW.

**HASIL PENELITIAN**

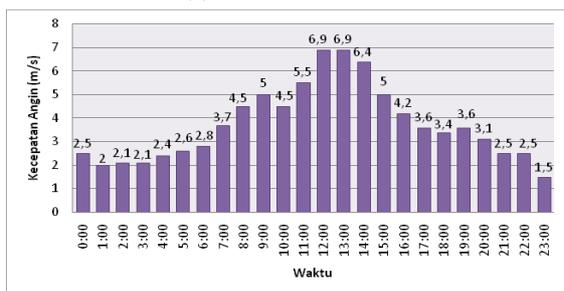
**Analisis Data Kecepatan Angin**

Pengukuran kecepatan angin dilakukan di daerah pantai Watu Ulo Jember pada musim kemarau (bulan September) dan musim penghujan (pada bulan Maret), dengan mengambil *sample* sehari selama 24 jam. Data bulan September mengacu pada data penelitian sebelumnya [6].

Ketinggian pengukuran kecepatan angin sebesar 2,5 meter sampai 3,78 meter dari permukaan tanah. Pengukuran angin dilakukan setiap satu jam sekali dengan mengambil data kecepatan rata-rata angin. Gambar 7 merupakan grafik data kecepatan angin.



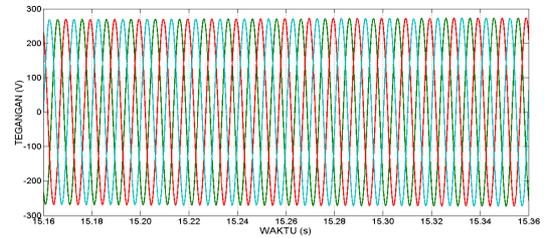
(a) Musim kemarau



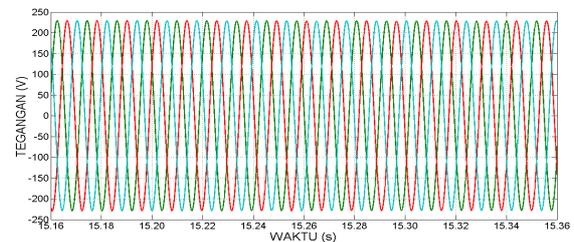
(b) Musim penghujan

**Gambar 7.** Grafik data kecepatan angin Simulasi Turbin Angin

Pada pengujian simulasi turbin angin menggunakan beban seimbang dan beban tak seimbang pada kondisi musim penghujan dan kemarau. Berikut merupakan hasil simulasi dari turbin angin dengan beban seimbang dan beban tak seimbang yang ditunjukkan pada gambar 8 dan gambar 9:

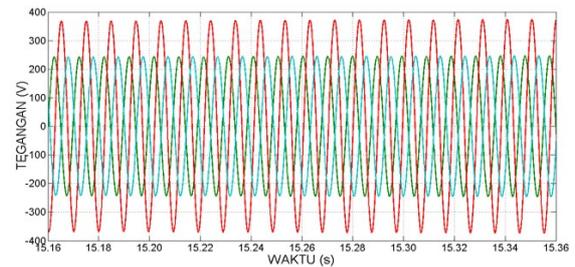


(a) Musim kemarau

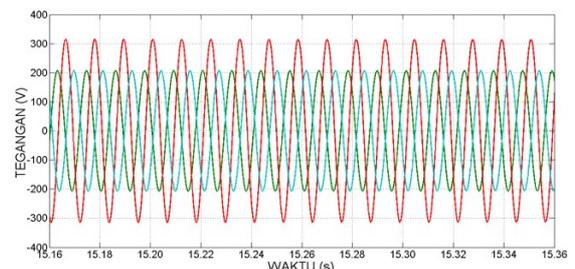


(b) Musim penghujan

**Gambar 8.** Hasil simulasi tegangan output turbin angin dengan beban seimbang



(a) Musim kemarau



(b) Musim penghujan

**Gambar 9.** Hasil simulasi tegangan output turbin angin dengan beban tak seimbang

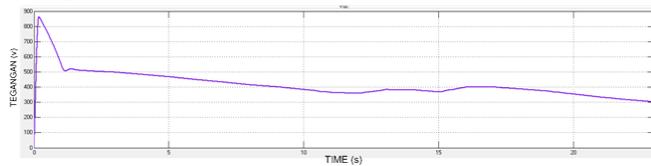
**Simulasi Kontrol *Switch Mode Converter* (MPPT)**

Pada simulasi ini, *switch mode converter* terdiri dari *rectifier* sebagai penyearah tegangan AC menjadi tegangan DC dan DC-DC *buck-boost converter* sebagai menaikkan dan menurunkan tegangan supaya dapat mencapai tegangan konstan sebesar 511 V.

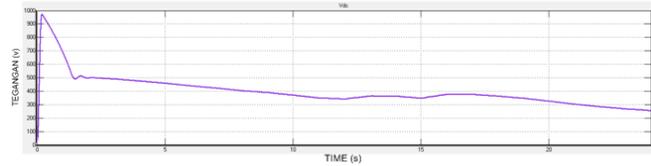
Nilai tegangan keluaran *rectifier* akan mencapai 300 V. Hal ini sesuai dengan tegangan yang dihasilkan oleh turbin

angin berdasarkan pada kecepatan angin yang berubah-ubah.

Berikut merupakan hasil grafik *rectifier* yang ditunjukkan pada gambar 10.



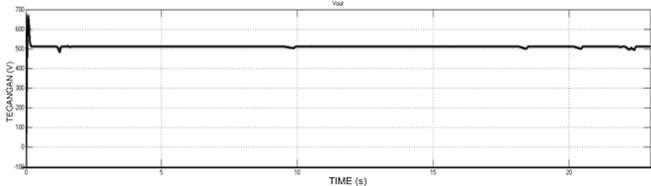
(a) Pemberian beban seimbang



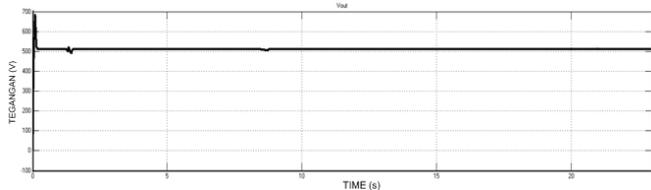
(b) Pemberian beban tak seimbang

**Gambar 10.** Hasil simulasi dari Vdc *rectifier*

Selanjutnya, hasil keluaran dari *rectifier* akan disalurkan ke *buck-boost converter*. Pada gambar 11 terlihat bahwa hasil simulasi dari *buck-boost converter* telah mencapai tegangan yang diinginkan sebesar 511 V.



(a) Pemberian beban seimbang



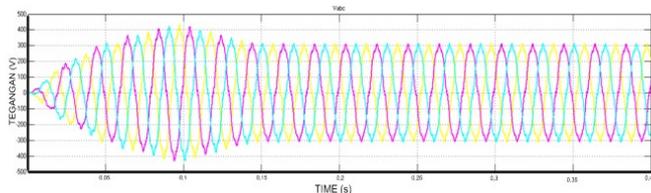
(b) Pemberian beban tak seimbang

**Gambar 11.** Hasil simulasi dari *buck-boost converter*

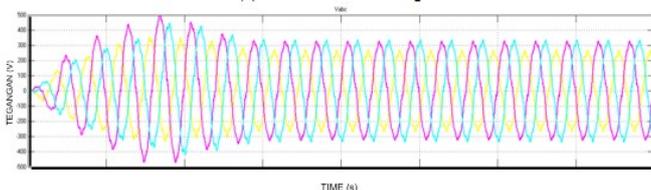
### Simulasi Inverter

Inverter ini digunakan untuk mengubah tegangan DC yang telah dihasilkan oleh rangkaian *buck-boost converter* menjadi tegangan AC 3 fasa, dimana tegangan yang dihasilkan dapat bernilai konstan.

Hasil simulasi dari inverter dapat diperoleh bentuk gelombang tegangan 3 fasa yang ditunjukkan pada gambar 10.



(a) Beban seimbang



TIME (s)

(b) Beban tak seimbang

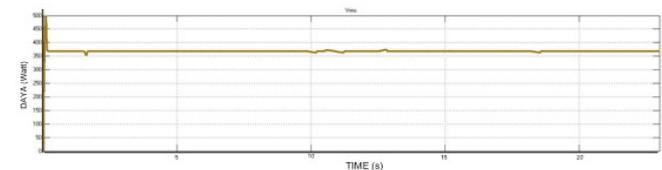
**Gambar 10.** Tegangan inverter 3 fasa

## PEMBAHASAN

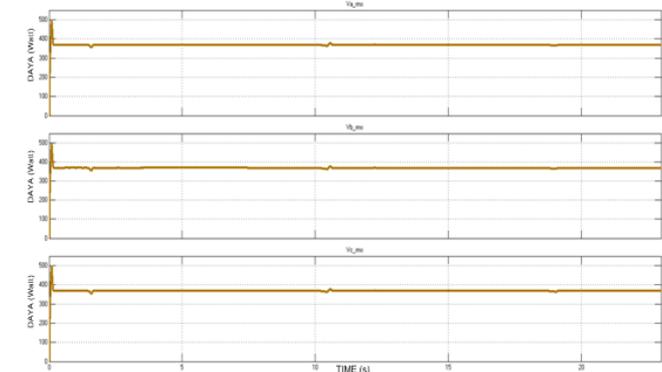
Dalam perancangan SKEA pada pembangkit listrik tenaga angin, kontrol MPPT terletak pada *buck-boost converter* yang dikendalikan oleh NN sehingga tegangan yang dihasilkan sesuai dengan yang diharapkan. NN melakukan sebuah proses pembelajaran untuk mengontrol PWM *buck-boost converter*. Dari proses ini, NN akan mengoreksi terhadap operasi yang dilakukan, hingga mencapai *error* terkecil.

Pada gambar 11, dilakukan dua pengujian yakni menggunakan beban seimbang dan tak seimbang. Tegangan *buck-boost converter* saat pemberian beban seimbang *ripple*-nya lebih sedikit daripada saat pemberian beban tak seimbang. Setelah tegangan mencapai nilai yang diinginkan, maka selanjutnya sistem akan terhubung ke inverter dan beban.

Hasil dari inverter dapat ditunjukkan pada gambar Inverter ini di atur oleh PWM yang dikontrol menggunakan PI *controller* supaya tegangan RMS yang dikeluarkan oleh inverter sebesar . Nilai Kp dan Ki pada PI *controller* ini adalah 0.4 dan 500. Tegangan RMS yang dihasilkan dapat ditunjukkan pada gambar 11.



(a) Beban seimbang



(b) Beban tak seimbang

**Gambar 11.** Bentuk gelombang tegangan RMS ( $V_{rms}$ ) inverter

Selanjutnya, daya output sistem pemodelan PLT angin menggunakan MPPT dilakukan dua pengujian, yang pertama menggunakan *neural network* dan yang kedua menggunakan PI *controller*. Kemudian hasil ini akan dibandingkan dengan pengujian tanpa MPPT.

Berikut merupakan hasil daya output yang dihasilkan pada beban seimbang maupun beban tak seimbang yang ditunjukkan pada tabel 3 dan tabel 4.

**Tabel 3.** Daya output dengan pemberian beban seimbang

Perbandingan	Daya output (Watt)	
	Musim Kemarau	Musim Penghujan
Tanpa MPPT	1121	675,1
MPPT menggunakan PI <i>controller</i>	1919	1850
MPPT menggunakan <i>neural network</i>	1919	1859

**Tabel 4.** Daya output dengan pemberian beban tak seimbang

Perbandingan	Daya output (Watt)					
	Musim Kemarau			Musim Penghujan		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Fasa A	Fasa B	Fasa C
Tanpa MPPT	1433	324,8	576,4	836,2	229,5	342,7
MPPT menggunakan PI <i>controller</i>	2206	683	1066	2193	676	1058
MPPT menggunakan <i>neural network</i>	2207	683,4	1068	2200	680	1062

Berdasarkan tabel 3 dan tabel 4 terlihat bahwa daya output yang dihasilkan MPPT menghasilkan daya yang lebih besar daripada daya output yang dihasilkan oleh tanpa MPPT. Pada MPPT menggunakan PI *controller* dan MPPT menggunakan *neural network* menghasilkan daya yang nilainya hampir sama, hal ini disebabkan karena pengontrolan ini dilakukan pada *buck-boost converter*.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil penelitian dan perancangan pemodelan sistem ini diperoleh beberapa kesimpulan antara lain daya yang dihasilkan oleh PLT angin pada beban seimbang di musim kemarau tanpa MPPT sebesar 1121 Watt dan menggunakan MPPT sebesar 1919 Watt, sedangkan pada musim penghujan tanpa MPPT sebesar 675,1 Watt dan menggunakan MPPT sebesar 1859 Watt, sehingga PLT angin yang telah dibuat dapat mengoptimalkan daya output yang dapat memenuhi permintaan beban. Sementara itu pada *buck-boost converter* dapat menghasilkan tegangan yang konstan yaitu sebesar 511 V meskipun kecepatan angin berubah-ubah.

Selanjutnya, Proses pelatihan NN diperoleh nilai *error* maksimal sebesar  $1,2 \cdot 10^{-7}$  dengan menggunakan 3 layer dan dapat menghasilkan respon yang lebih cepat dibandingkan menggunakan kontrol PI, hal ini terbukti bahwa *ripple* yang dihasilkan oleh tegangan *buck-boost converter* lebih besar menggunakan kontrol PI dibandingkan kontrol NN.

Agar menghasilkan hasil yang lebih baik, dapat ditambahkan adanya baterai untuk menyimpan daya lebih yang dihasilkan oleh turbin angin dan sebaiknya dilanjutkan pembahasan tentang jaringan (*grid*) distribusi secara luas supaya dapat disalurkan ke konsumen pengguna listrik dalam skala kecil maupun besar.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Inderpreet Singh Wander, "Modeling Of Synchronous Generator And Full-Scale Converter For Distribution System Load Flow Analysis", Master of Technology, Electrical Engineering, P. A. University, India, 2011
- [2] Ismoyo Haryanto, "Pengembangan Perancangan Airfoil Sudu Turbin Angin Kecepatan Rendah Berbasis Komputasi Cerdas", Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, 2009.
- [3] Surya Dharma, "Perancangan dan Pengujian Generator Magnet Permanen 1 Fase Berbasis Motor Induksi", Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, 2010.
- [4] Suryo Mochammad Hidayat, "Rancang Bangun Buck-Boost Konverter", Program Studi Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 2010.
- [5] T. Sutojo, dkk, *Kecerdasan Buatan*, Universitas Dian Nuswantoro, Semarang, 2010.
- [6] Rizal Noer Afandhi, "Metode Optimasi Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Daerah Tepi Pantai Watu Ulo Menggunakan PI-Fuzzy Logic Controller", Jurusan Teknik Elektro, Universitas Jember, Jember, 2013.