

# MPPT *Fuzzy Logic* dengan Pengendali PI pada Generator Sinkron Magnet Permanen untuk Aplikasi Pembangkit Listrik Piko hidro

SOFIAN YAHYA, ADNAN RAFI AL TAHTAWI, SARJONO WAHYU JADMIKO,  
KARTONO WIJAYANTO

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung  
Email: [sofianyahya@polban.ac.id](mailto:sofianyahya@polban.ac.id)

*Received* 31 Juli 2021 | *Revised* 24 Agustus 2021 | *Accepted* 16 September 2021

## ABSTRAK

*Perubahan laju aliran air pada pembangkit listrik piko hidro dapat menyebabkan daya dan tegangan yang dihasilkan generator menjadi tidak stabil. Penelitian ini bertujuan untuk merancang Maximum Power Point Tracking (MPPT) dengan algoritma logika fuzzy pada Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) dengan penstabil tegangan untuk aplikasi pembangkit listrik piko hidro. Pada penelitian ini digunakan dua unit konverter DC/DC tipe buck-boost yang dipasang secara serial. MPPT logika fuzzy dirancang untuk mengendalikan konverter pertama, sedangkan pengendali PI digunakan pada konverter kedua. Hasil pengujian secara simulasi dengan skenario kecepatan turbin konstan menunjukkan PMSG mampu menghasilkan daya maksimum 167 Watt pada kecepatan turbin 600 rpm dengan tegangan keluaran 14 V. Pengujian dengan skenario perubahan kecepatan turbin dan perubahan beban menunjukkan PMSG mampu menjejaki daya maksimum serta menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dengan overshoot terbesar sekitar 33%.*

**Kata kunci:** MPPT, PMSG, logika fuzzy, pengendali PI, piko hidro

## ABSTRACT

*The changes in the water flow rate on pycydro power plant can cause the power and voltage generated by the generator to become unstable. This study aims to design Maximum Power Point Tracking (MPPT) with fuzzy logic algorithm on Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) with voltage regulator for pycydro power plant applications. In this study, two units buck-boost DC/DC converter were installed in series. The fuzzy logic MPPT is designed to control the first converter, while the PI controller is used in the second converter. Simulation test results with a constant turbine speed scenario show that PMSG is able to produce a maximum power of 167 Watts at a turbine speed of 600 rpm with an output voltage of 14 V. Tests with scenarios of changes in turbine speed and changes in load show PMSG is able to track maximum power and produce a stable output voltage with the biggest overshoot is about 33%.*

**Keywords:** MPPT, PMSG, fuzzy logic, PI controller, pycydro

## 1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan sistem energi terbarukan telah menarik banyak perhatian. Perubahan dari sistem energi berbasis bahan bakar fosil tradisional menjadi sistem energi terbarukan yang bervariasi menjadi tantangan teknis dan lembaga terkait **(Aljarhizi, dkk, 2019)**. Dalam transisi menuju 100% sistem energi terbarukan, salah satu langkah yang disarankan adalah sistem energi cerdas (*smart energy system*) yang didasarkan pada gagasan sistem energi masa depan pada VRES (*Variable Renewable Energy System*) **(Djörup, dkk, 2018)**. Pada tahun 2025, komposisi bauran energi nasional mengasumsikan minyak akan tetap berada pada posisinya sebagai sumber energi utama sebesar 42%, disusul batubara sebesar 35%, gas alam sebesar 21%, tenaga air sebesar 1,9%, energi panas bumi 1,1%, dan mini/mikro tenaga air 0,1% dengan energi terbarukan sebesar 26 GW **(Abdullah, dkk, 2020)**.

Potensi energi listrik berbasis hidro, baik skala besar maupun kecil, sudah lama telah dimanfaatkan oleh pemerintah sebagai sumber energi utama terbarukan yang bisa bersaing dengan batubara. Bahkan untuk daerah terpencil, potensi mini hidro lebih disukai untuk memenuhi kebutuhan energi dibandingkan dengan sumber energi lainnya **(Halimatussadiyah, dkk, 2020)**. Di daerah pedesaan dengan jumlah konsumen yang relatif rendah dan perluasan sistem jaringan juga dianggap tidak ekonomis, pembangkit listrik tenaga air skala kecil dapat memberikan solusi untuk masalah energi listrik selain surya fotovoltaik yang tidak tersedia sepanjang hari **(Motwani, dkk, 2013)**. Pembangkit listrik pikoHidro merupakan salah satu sumber energi terbarukan dengan daya ratusan hingga 5 kW yang dapat memberikan manfaat yang besar bagi masyarakat dalam memenuhi energi listrik tanpa harus mengeluarkan biaya yang tinggi sehingga dapat digunakan untuk keperluan rumah tangga **(Chen, dkk, 2013)** **(Williamson, dkk, 2013)**. Menurut laporan Bank Dunia pembangkit listrik pikoHidro merupakan pembangkit listrik skala kecil yang murah dengan daya maksimum yang dihasilkan sekitar 5 kW **(Williamson, dkk, 2013)**. Ada dua jenis generator yang sering digunakan untuk kecepatan variabel, yaitu *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) dan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Dibandingkan dengan DFIG, PMSG memiliki beberapa keunggulan seperti bobot lebih ringan, ukurannya kecil, tanpa roda gigi, dan biaya perawatan ringan **(Karbakhsh, dkk, 2012)**. Berdasarkan hasil pengujian, kelemahan dari pikoHidro dengan PMSG tanpa pengendali adalah keluaran tegangan dan frekuensi yang mudah berubah mengikuti kecepatan turbin **(Kerdtuad, dkk, 2018)**.

Metode yang sering digunakan untuk mendapatkan keluaran daya maksimum adalah *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Berbagai penelitian telah banyak dilakukan untuk mendapatkan daya yang optimal dari PMSG dengan MPPT. Nicy dan Punitharaji dalam makalahnya meneliti sistem pembangkit *hybrid* angin-hidro yang terisolasi. Satu pembangkit menggunakan PMSG yang digerakkan oleh turbin angin dengan kecepatan variabel dan satu lagi dengan PMSG digerakkan oleh turbin hidro dengan kecepatan konstan. Hasil yang dicapai adalah efisiensi yang lebih baik dalam penggunaan sistem *hybrid* dengan logika *fuzzy* menggunakan simulasi dengan MATLAB **(Nicy & Punitharaji, 2014)**. Tiwari dan Babu dalam papernya memodelkan tiga pengendali MPPT dengan perangkat lunak MATLAB yaitu Proporsional Integral (PI), *Perturb and Observe* (P&O), dan *Fuzzy Logic Control* (FLC). Penelitian ini membandingkan keluaran untuk turbin energi angin dengan kondisi kecepatan angin yang bervariasi. Berdasarkan hasil simulasi penulis menyimpulkan bahwa FLC untuk WECS (*Wind Energy Conversion System*) yang berdiri sendiri lebih unggul dan efisien daripada teknik PI dan P&O dalam hal stabilitas, kemampuan pelacakan, dan fluktuasi **(Tiwari & Babu, 2016)**. Penelitian serupa juga dilakukan **(Abdellatif, dkk, 2021)** yang membandingkan algoritma P&O, *Incremental Conductance* (IC), dan logika fuzzy pada sistem panel surya. Hasilnya

menunjukkan bahwa logika fuzzy mampu menghasilkan daya keluaran yang paling besar jika dibandingkan algoritma MPPT lainnya.

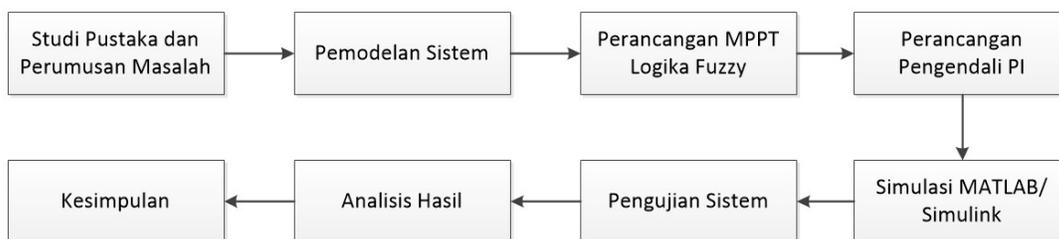
Jika dibandingkan beberapa teknik MPPT yang banyak digunakan, logika fuzzy merupakan teknik yang mampu menghasilkan daya yang paling besar. Metode ini banyak diaplikasikan untuk berbagai sistem pembangkitan tenaga listrik seperti panel surya (**Assegaf, dkk, 2021**) dan turbin angin (**Jaya & Sujono, 2018**). Namun demikian dalam hal implementasi, teknik logika fuzzy memiliki komputasi yang paling kompleks jika dibandingkan dengan algoritma lainnya. Meskipun demikian, beberapa teknik MPPT lain juga memungkinkan untuk diterapkan selain beberapa teknik yang disebutkan di atas. K. Karthi, dkk. pada penelitiannya menganalisis algoritma kontrol MPPT adaptif untuk generator energi angin mandiri dengan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Hasil yang diperoleh menunjukkan efektivitas algoritma kendali MPPT adaptif dalam memaksimalkan transfer daya ke beban selama perubahan mendadak dalam kecepatan angin (**Karthi, dkk, 2019**). Metode algoritma *nonlinear backstepping* untuk MPPT pada sistem konversi energi angin dengan kecepatan variabel (*pitch*) tetap diteliti oleh Khan, dkk. Hasil simulasi dengan perangkat lunak MATLAB/Simulink memvalidasi kekokohan sesuai skema kontrol yang diusulkan (**Khan, dkk, 2020**). Pada intinya, beberapa teknik MPPT dapat digunakan untuk memaksimalkan daya keluaran dengan berbagai kelebihan dan kekurangannya. Meskipun MPPT dapat menghasilkan daya keluaran maksimum, namun MPPT tidak dapat menghasilkan tegangan yang stabil di bagian keluaran. MPPT hanya akan mengikuti daya maksimum generator yang dihasilkan dari putaran turbin. Dengan demikian, diperlukan skema kendali tambahan agar diperoleh tegangan yang stabil untuk kebutuhan pembebanan khususnya pada aplikasi pembangkit pikohidro.

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan daya keluaran PMSG maksimum dan tegangan keluaran yang stabil menggunakan MPPT logika fuzzy dan pengendali PI untuk aplikasi pembangkit pikohidro dengan daya maksimal 200 W. Skema yang diusulkan adalah menggunakan dua unit konverter DC/DC tipe *buck-boost* yang dihubungkan secara seri. Konverter pertama digunakan untuk MPPT, sedangkan konverter kedua digunakan sebagai penstabil tegangan. Pada konverter kedua, dirancang skema kendali *closed-loop* menggunakan pengendali PI agar dihasilkan tegangan keluaran yang diinginkan. Skema ini diadaptasi dari penelitian (**Kaouane, dkk, 2016**) yang menggunakan *double buck-boost converter* untuk sistem panel surya. Perbedaannya terletak pada jenis konverter DC/DC yang digunakan dan aplikasi *power plant*-nya. Dengan skema ini, maka dapat diperoleh daya maksimum dari generator dan juga tegangan keluaran yang stabil untuk kebutuhan pembebanan pada sistem pembangkit pikohidro. Penelitian ini menggunakan simulasi MATLAB/Simulink untuk melihat unjuk kerja dari metode yang diusulkan.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Langkah Penelitian

Adapun langkah penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1. Penelitian diawali dengan melakukan studi pustaka terkait sistem PMSG khususnya pada aplikasi pembangkit pikohidro. Kemudian ditentukan perumusan masalah dari hasil studi pustaka tersebut. Selanjutnya dilakukan pemodelan sistem yang akan dirancang yang meliputi model PMSG, penyearah, dan konverter DC/DC. Berikutnya dirancang algoritma MPPT logika fuzzy dengan pengendali PI dan kemudian direalisasikan dalam bentuk simulasi MATLAB/Simulink. Pada tahap akhir dilakukan pengujian terhadap sistem, analisis hasil, dan penarikan kesimpulan.



**Gambar 1. Langkah Penelitian**

## 2.2 Model Generator Sinkron Magnet Permanen

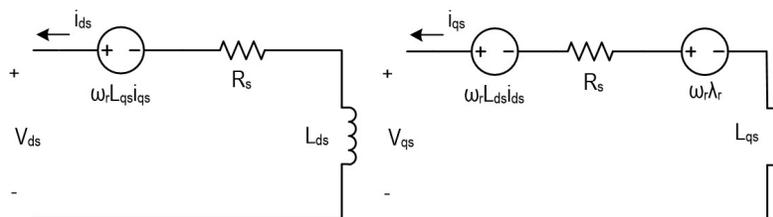
Generator sinkron magnet permanen atau *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) merupakan sebuah mesin yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Mesin ini dapat mengubah torsi (T) dan kecepatan putar rotor ( $\omega$ ) yang diterimanya dari *blade* menjadi nilai tegangan (V) dan arus (I). Hasil keluaran dari generator ini berupa tegangan listrik AC 3 fasa. Generator ini tidak membutuhkan sistem eksitasi karena sumber eksitasi disediakan oleh magnet permanen pada rotor, sehingga mengurangi kesulitan dalam sistem kontrolnya. PMSG biasanya digunakan untuk membangkitkan listrik pada daya rendah seperti dari sumber angin ataupun aliran sungai kecil (*pycohydro*). Kelebihan menggunakan PMSG adalah biaya yang rendah, ketahanan, dan kesederhanaan konstruksinya. Namun salah satu kelemahan utamanya adalah perlunya kompensator faktor daya dan efisiensi yang rendah (Acharya, dkk, 2016) (Ben Ali, dkk, 2017).

Secara umum, model dinamik PMSG dapat diturunkan dari *axis frame direct* (d) dan *quadrature* (q) dimana fasa *q-axis* mendahului 90 dari *d-axis*. Untuk mengetahui tegangan 3 fasa yang dihasilkan generator, maka dilakukan transformasi antara *dq-frame* ke *abc-frame* seperti ditunjukkan pada Persamaan (1) berikut.

$$\begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) & \cos(\omega t - 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

dengan  $F$  merepresentasikan tegangan, arus, atau induktansi yang nilainya bergantung pada posisi rotor.

Adapun rangkaian ekuivalen dari model PMSG pada *dq-axis* di bagian rotor dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2. Model Sederhana PMSG pada *d-axis* (Kiri) dan Sumbu *q-axis* (Kanan) Stator**

Besarnya arus yang dihasilkan pada  $d$ -axis dan  $q$ -axis memenuhi Persamaan (2) dan (3) berikut.

$$\frac{d}{dt} i_{ds} = -\frac{R_s}{L_d} i_{ds} + \frac{L_{qs}}{L_{ds}} \omega_r i_{qs} - \frac{1}{L_d} V_{ds} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} i_{qs} = -\frac{R_s}{L_q} i_{qs} + \frac{L_{ds}}{L_{qs}} \omega_r i_{ds} - \frac{1}{L_q} \omega_r \lambda_r - \frac{1}{L_q} V_{qs} \quad (3)$$

dengan  $i_{ds}$  dan  $i_{qs}$  merupakan arus stator pada  $dq$ -axis,  $L_{ds}$  dan  $L_{qs}$  adalah induktansi stator pada  $dq$ -axis,  $R_s$  adalah resistansi stator,  $\omega_r$  adalah kecepatan rotor,  $\lambda_r$  fluks rotor, serta  $V_{ds}$  dan  $V_{qs}$  adalah tegangan stator pada  $dq$ -axis.

Adapun model mekanik dari generator yang direpresentasikan oleh  $\omega_r$  memenuhi Persamaan (4) dan (5) berikut.

$$\omega_r = \frac{P}{J} (T_e - T_m) \quad (4)$$

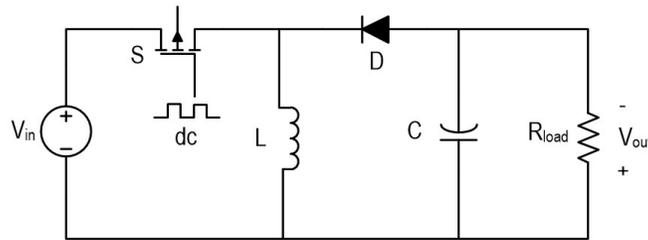
dengan

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_r i_{qs} - (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs}) \quad (5)$$

dimana  $P$  adalah jumlah kutub pada stator,  $J$  adalah momen inersia generator,  $T_e$  adalah torsi elektromagnetik, dan  $T_m$  adalah torsi mekanik.

## 2.2 Model Konverter DC/DC

Konverter DC/DC merupakan sebuah perangkat elektronika yang berfungsi untuk mengubah satu tegangan DC menjadi tegangan DC lainnya. Terdapat tiga jenis konverter DC/DC, yaitu tipe *buck (step-up)*, tipe *boost (step-down)*, dan tipe *buck-boost (step-up step-down)*. Konverter DC/DC bekerja dengan cara melakukan pensaklaran pada mosfet dengan *duty cycle* ( $d$ ) tertentu. Jenis konverter yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe *buck-boost* seperti ditunjukkan Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian Konverter DC/DC Tipe *Buck-Boost*

Pada rangkaian Gambar 3, terdapat komponen mosfet untuk pensaklaran (S), induktor (L), dioda (D), kapasitor (C), dan beban ( $R_{load}$ ). Mosfet akan mendapatkan pensaklaran dengan rentang *duty cycle* antara 0 - 0,9 % yang menghasilkan mode *buck* dan *boost*. Jika *duty cycle*  $< 0,5$  maka akan terjadi mode *buck*, jika *duty cycle*  $> 0,5$  maka akan terjadi mode *boost*, sedangkan jika *duty cycle* = 0,5 maka tegangan masukan ( $V_{in}$ ) sama dengan tegangan keluaran ( $V_{out}$ ). Adapun untuk menghitung nilai setiap parameter pada konverter DC/DC tipe *boost*, digunakan Persamaan (6) sampai Persamaan (9) berikut.

1. Menentukan *duty cycle* ( $d$ )

$$V_{out} = \frac{-d}{1-d} V_{in} \quad (6)$$

2. Menentukan induktansi minimum ( $L_{min}$ )

$$L_{min} = \frac{R(1-d)^2}{2F} \quad (7)$$

3. Menentukan arus induktor ( $i_L$ )

$$i_L = \frac{V_{in}d}{R(1-d)^2} \quad (8)$$

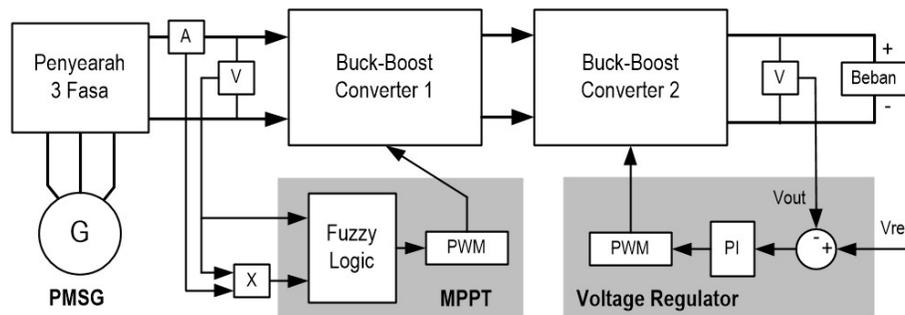
4. Menentukan nilai kapasitor minimum ( $C_{min}$ )

$$C_{min} = \frac{d}{FRr} \quad (9)$$

dengan  $F$  adalah frekuensi pensaklaran dan  $r$  adalah persentase *ripple* tegangan.

### 2.3 Perancangan MPPT dengan Penstabil Tegangan

Diagram blok sistem yang diusulkan dapat dilihat pada Gambar 4. Sistem yang dirancang terdiri dari generator magnet permanen (PMSG), penyearah tiga fasa, dua unit konverter DC/DC tipe *buck-boost*, MPPT logika fuzzy, pengendali PI, dan beban. Generator akan membangkitkan tegangan AC tiga fasa dari turbin air dan kemudian disearahkan oleh penyearah. Keluaran penyearah kemudian dihubungkan dengan konverter DC/DC tipe *buck-boost* pertama. Arus (A) dan tegangan (V) dari penyearah dideteksi sebagai masukan algoritma MPPT berupa tegangan dan daya. Kemudian dilakukan pensaklaran dengan MPPT logika fuzzy untuk menghasilkan perubahan *duty cycle* yang kemudian dikonversi menjadi sinyal PWM. Tegangan DC keluaran dari konverter DC/DC pertama kemudian dihubungkan kembali dengan konverter DC/DC kedua agar dihasilkan tegangan keluaran ( $V_{out}$ ) yang stabil sesuai dengan yang dikehendaki ( $V_{ref}$ ) menggunakan pengendali PI.



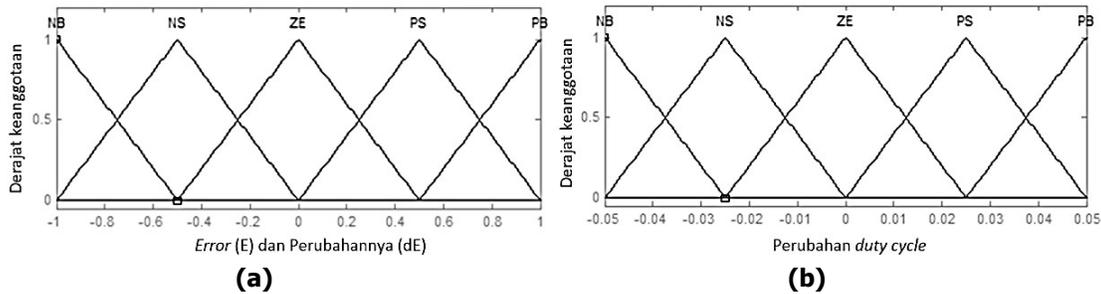
**Gambar 4. Diagram Blok MPPT dengan Penstabil Tegangan**

Logika fuzzy untuk MPPT dirancang dengan masukan berupa perubahan tegangan dan daya yang kemudian dikonversi menjadi sinyal *error* dan perubahan *error* seperti pada Persamaan (10) dan (11) berikut.

$$E = \frac{dP}{dV} = \frac{P(t) - P(t-1)}{V(t) - V(t-1)} \quad (10)$$

$$dE = E(t) - E(t-1) \quad (11)$$

Besarnya nilai *error* dan perubahan *error* tersebut kemudian dibuat dalam bentuk fungsi keanggotaan segitiga dengan fungsi keanggotaan keluaran berupa perubahan *duty cycle* yang juga dibuat dalam fungsi keanggotaan segitiga seperti ditunjukkan Gambar 5. Kedua fungsi keanggotaan masukan terdiri dari lima himpunan segitiga dengan nilai -1 sampai 1 yang memiliki variabel linguistik *Negative Big* (NB), *Negative Small* (NS), *Zero* (ZE), *Positive Small* (PS), dan *Positive Big* (PB). Pada fungsi keanggotaan keluaran, juga dirancang lima himpunan keanggotaan yang sama dengan rentang nilai -0,05 sampai 0,05.



**Gambar 5. Fungsi Keanggotaan: (a) Masukan *Error* Dan Perubahannya, (b) Keluaran Perubahan *Duty Cycle***

Kedua masukan tersebut kemudian diolah dengan aturan IF-THEN menggunakan inferensi tipe Mamdani sesuai dengan basis aturan pada Tabel 1 (Abdellatif, dkk, 2021).

**Tabel 1. Basis aturan logika fuzzy**

E/dE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Basis aturan ini disusun berdasarkan logika pada MPPT dengan memperhatikan grafik P-V dimana akan dibandingkan perubahan daya terhadap perubahan tegangan untuk menghasilkan *duty cycle*. Jika perubahan daya terhadap tegangan bernilai positif/negatif dan selisih dengan nilai sebelumnya juga sama, maka *duty cycle* tambahan dibiarkan 0. Pada kondisi ini maka *duty cycle* yang digunakan adalah 0,5 (nominal). Namun, jika terdapat perubahan daya terhadap tegangan positif/negatif dan nilai sebelumnya berbeda, maka akan menghasilkan *duty cycle* tambahan yang akan menambah atau mengurangi *duty cycle* nominal agar daya keluaran dapat tetap berada di nilai maksimalnya.

Pada bagian penstabil tegangan, penelitian ini menggunakan pengendali PI. Jenis pengendali ini banyak digunakan untuk aplikasi pengendali tegangan keluaran konverter DC/DC karena sederhana dalam hal perancangan dan implementasi. Metode yang digunakan untuk menentukan konstanta  $K_p$  dan  $K_i$  adalah *trial and error* menggunakan aplikasi PID Tuner pada MATLAB/Simulink dengan hasil  $K_p = 0,21$  dan  $K_i = 8,55$ .

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

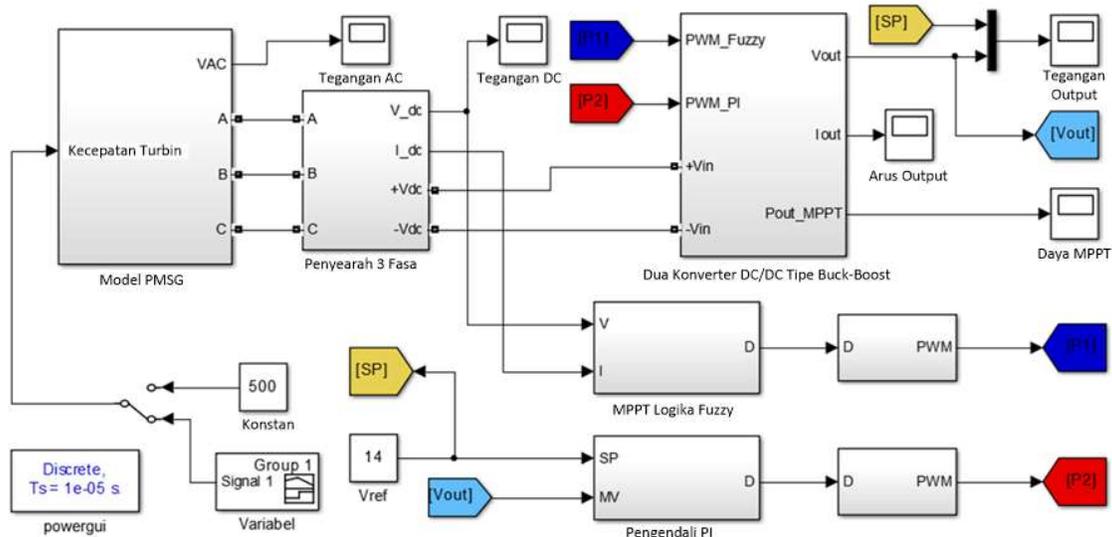
#### 3.1 Spesifikasi Sistem

Untuk kebutuhan pengujian sistem secara simulasi, maka terlebih dahulu ditetapkan spesifikasi sistem khususnya konverter DC/DC *buck-boost* seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Spesifikasi Sistem**

Parameter	Nilai
Daya maksimum PMSG ( $P_{maks}$ )	200 W
Kecepatan turbin ( $w$ )	150-600 RPM
Tegangan masukan ( $V_{in}$ )	10-24 VAC
Tegangan referensi ( $V_{ref}$ )	14 V
Beban ( $R$ )	10 Ohm
Induktorminimum ( $L_{min}$ )	109,52uH (200 uH)
Kapasitor minimum ( $C_{min}$ )	232 uF(300 uF)
Frekuensi (F)	25 KHz
<i>Ripple</i> Tegangan (r)	0,01

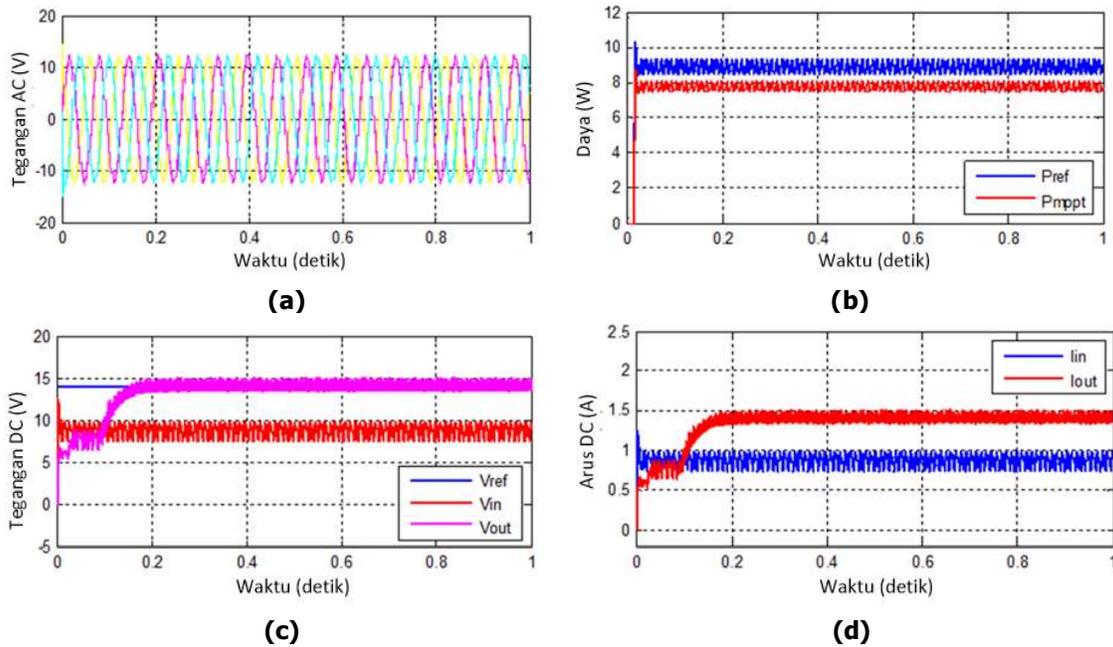
Parameter yang digunakan dihitung berdasarkan nilai minimum yang dihitung menggunakan Persamaan (6) sampai Persamaan (9). Parameter tersebut kemudian direalisasikan dalam bentuk simulasi menggunakan MATLAB/Simulink seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Adapun perangkat MATLAB/Simulink yang digunakan adalah versi R2013a dengan parameter waktu sampling simulasi 50 us. Setelah rangkaian simulasi dibuat, kemudian sistem diuji menggunakan beberapa skenario pengujian, yaitu pengujian dengan kecepatan turbin konstan, pengujian dengan kecepatan turbin berubah, dan pengujian dengan kecepatan turbin acak. Kemudian dilakukan juga pengujian dengan beban berubah untuk setiap skenario tersebut. Pada setiap pengujian akan dianalisis tegangan AC dari generator, daya yang dihasilkan MPPT, tegangan keluaran pada beban, dan arus pada beban.



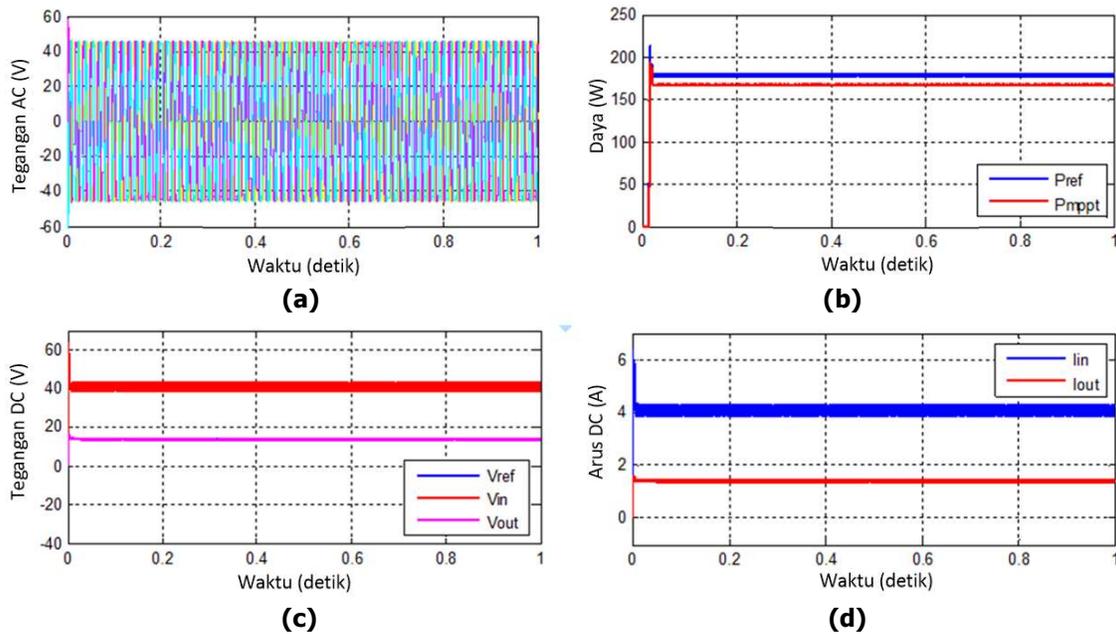
**Gambar 6. Rangkaian Simulasi pada MATLAB/Simulink**

### 3.2 Pengujian dengan Kecepatan Turbin Konstan

Pada bagian ini, sistem diuji dengan kecepatan turbin konstan pada nilai minimal dan maksimalnya dengan beban 10 Ohm. Sesuai dengan spesifikasi pada Tabel 2, kecepatan minimal turbin adalah 150 RPM, sedangkan kecepatan maksimalnya adalah 600 RPM. Adapun hasil pengujian dengan kecepatan minimal dapat dilihat pada Gambar 7, sedangkan pengujian pada kecepatan maksimal dapat dilihat pada Gambar 8.



**Gambar 7. Pengujian dengan Kecepatan Turbin 150 RPM: (a) Tegangan AC, (b) Daya MPPT pada Konverter Pertama, (c) Tegangan DC pada Konverter Kedua, (d) Arus DC pada Konverter Kedua**



**Gambar 8. Pengujian dengan Kecepatan Turbin 600 RPM: (a) Tegangan AC, (b) Daya MPPT pada Konverter Pertama, (c) Tegangan DC pada Konverter Kedua, (d) Arus DC pada Konverter Kedua**

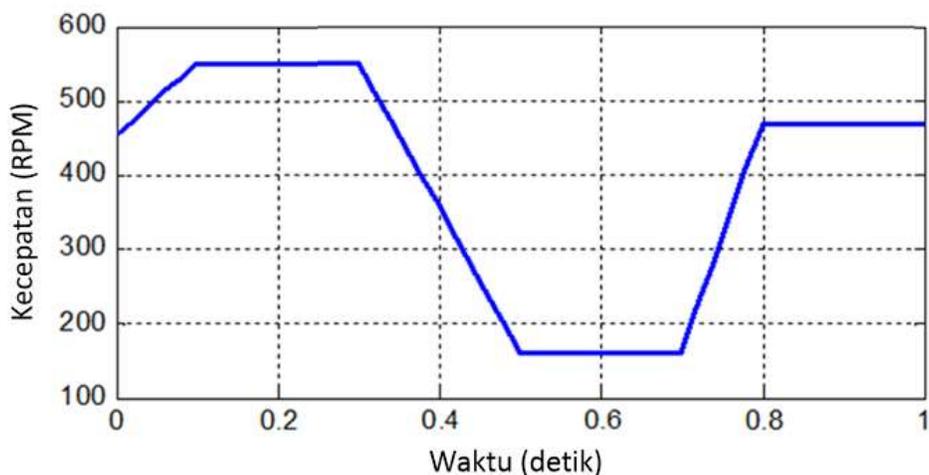
Berdasarkan pengujian dapat dilihat bahwa pada Gambar 7(a) tegangan AC minimal yang dihasilkan oleh generator adalah 12 Vp-p. Tegangan AC ini kemudian diubah oleh penyearah tiga fasa sehingga menjadi tegangan DC. Gambar 7(b) menunjukkan daya yang dihasilkan oleh penyearah (Pref) dengan daya keluaran konverter pertama (Pmppt) dengan logika fuzzy.

Hasilnya dapat dilihat bahwa daya keluaran konverter mampu menjejaki daya maksimum dari penyearah meskipun terdapat selisih 1,2 W. Gambar 6(c) menunjukkan tegangan DC yang dihasilkan pada konverter kedua. Hasilnya dapat dilihat bahwa tegangan keluaran ( $V_{out}$ ) mampu mengikuti tegangan referensi ( $V_{ref}$ ) sebesar 14 V meskipun tegangan masukan konverter ( $V_{in}$ ) lebih rendah yaitu sekitar 8 V. Pada kondisi ini artinya konverter bekerja pada mode *boost*. Arus yang mengalir pada konverter kedua dapat dilihat pada Gambar 7(d). Hasilnya menunjukkan arus masukan ( $I_{in}$ ) yang diperoleh dari konverter pertama sebesar 0,8 A mampu dinaikkan menjadi 1,4 A ( $I_{out}$ ).

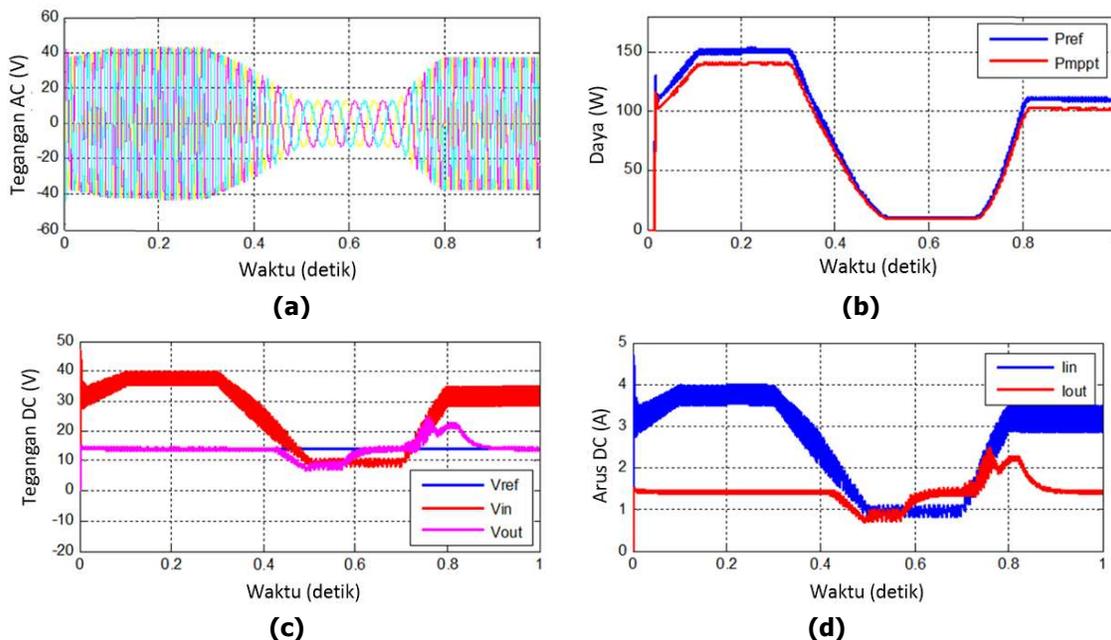
Pada pengujian kecepatan maksimal, diperoleh bahwa pada Gambar 8(a) tegangan AC maksimal yang dihasilkan adalah 45 Vp-p. Tegangan AC ini kemudian diubah menjadi tegangan DC oleh penyearah tiga fasa. Gambar 8(b) menunjukkan daya yang dihasilkan oleh penyearah ( $P_{ref}$ ) dengan daya keluaran konverter pertama ( $P_{mppt}$ ) dengan logika fuzzy. Hasilnya menunjukkan bahwa daya keluaran konverter sebesar 167 W mampu menjejaki daya maksimum dari penyearah sebesar 178 W. Gambar 7(c) menunjukkan tegangan DC yang dihasilkan pada konverter kedua. Hasilnya menunjukkan bahwa tegangan keluaran ( $V_{out}$ ) mampu mengikuti tegangan referensi ( $V_{ref}$ ) sebesar 14 V meskipun tegangan masukan konverter ( $V_{in}$ ) lebih tinggi yaitu sebesar 40 V. Pada kondisi ini artinya konverter bekerja pada mode *buck*. Gambar 7(d) menunjukkan arus yang mengalir pada konverter kedua. Hasilnya dapat dilihat bahwa arus masukan ( $I_{in}$ ) yang diperoleh dari konverter pertama sebesar 4 A mampu diturunkan menjadi 1,4 A ( $I_{out}$ ).

### 3.3 Pengujian dengan Kecepatan Turbin Berubah

Pada skenario ini, sistem diuji dengan kecepatan turbin berubah yaitu pada nilai awal 450 RPM, kemudian naik ke 550 RPM, turun ke 160 RPM, dan naik lagi ke 470 RPM seperti diilustrasikan pada Gambar 9. Pada pengujian ini masih digunakan beban yang sama yaitu 10 Ohm. Adapun hasil pengujian dengan kecepatan turbin berubah dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 9. Kecepatan Turbin Berubah

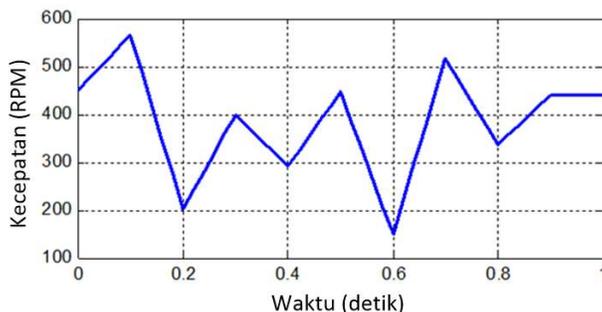


**Gambar 10. Pengujian dengan Kecepatan Turbin Berubah: (a) Tegangan AC, (b) Daya MPPT pada Konverter Pertama, (c) Tegangan DC pada Konverter Kedua, (d) Arus DC pada Konverter Kedua**

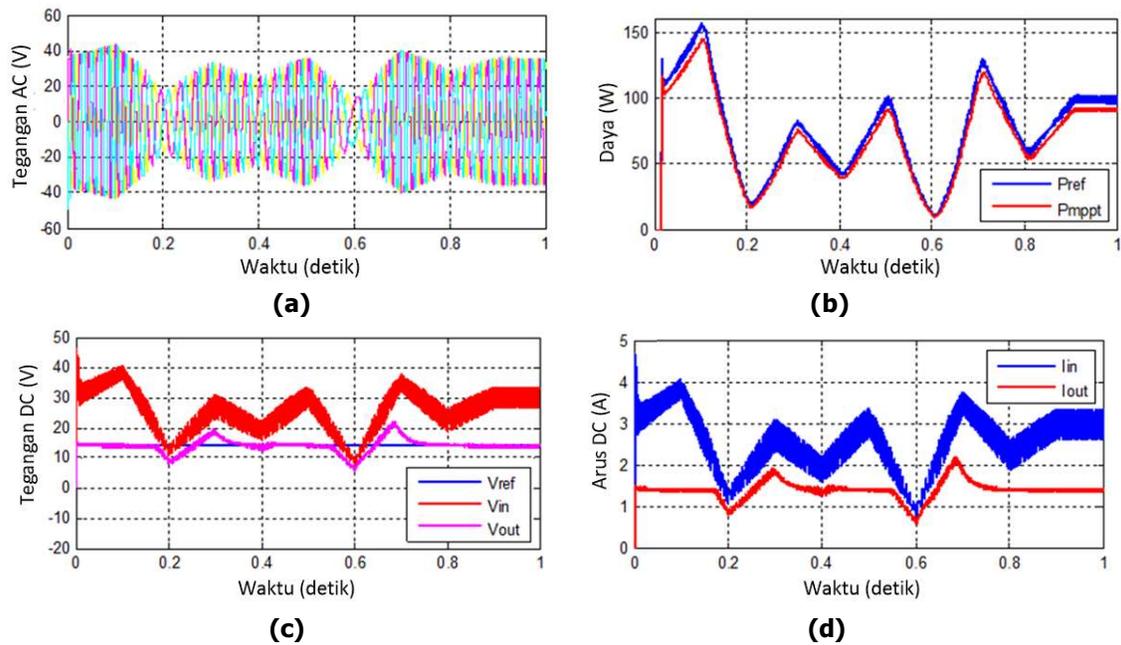
Berdasarkan hasil pengujian, dapat dilihat bahwa Gambar 10(a) menunjukkan tegangan AC yang dihasilkan oleh generator amplitudonya berubah mengikuti perubahan kecepatan turbin. Gambar 10(b) menunjukkan daya keluaran konverter pertama (Pmppt) dengan logika fuzzy mampu menjejaki daya yang dihasilkan oleh penyearah (Pref) meskipun masih terdapat selisih. Dapat dilihat pula bahwa semakin kecil daya, selisih antara Pref dan Pmppt semakin kecil. Gambar 10(c) menunjukkan tegangan DC yang dihasilkan pada konverter kedua (Vout) mampu mengikuti tegangan referensi (Vref) meskipun tegangan masukan konverter (Vin) berubah. Pada kondisi ini konverter kedua bekerja pada mode *buck-boost* dimana terjadi *overshoot* sebesar 33,33% saat terjadi perubahan mode *buck* ke *boost* maupun sebaliknya. Gambar 10(d) menunjukkan arus DC pada konverter kedua dimana arus keluaran (Iout) dapat dikendalikan pada 1,4 A meskipun arus masukan (Iin) berubah dan terdapat *overshoot*.

### 3.4 Pengujian dengan Kecepatan Turbin Acak

Pada skenario berikutnya, sistem diuji dengan kecepatan turbin acak antara 150 RPM sampai dengan 550 RPM seperti diilustrasikan pada Gambar 11. Pada pengujian ini masih digunakan beban yang sama yaitu 10 Ohm dengan hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 12.



**Gambar 11. Kecepatan Turbin Acak**

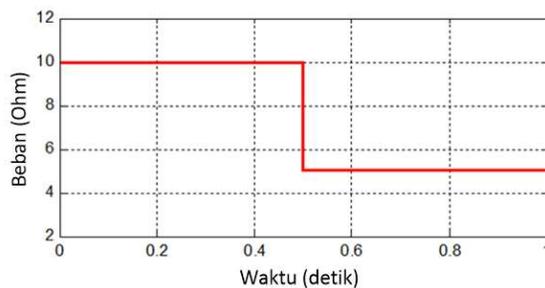


**Gambar 12. Pengujian dengan kecepatan turbin acak: (a) Tegangan AC, (b) Daya MPPT pada konverter pertama, (c) Tegangan DC pada konverter kedua, (d) Arus DC pada konverter kedua**

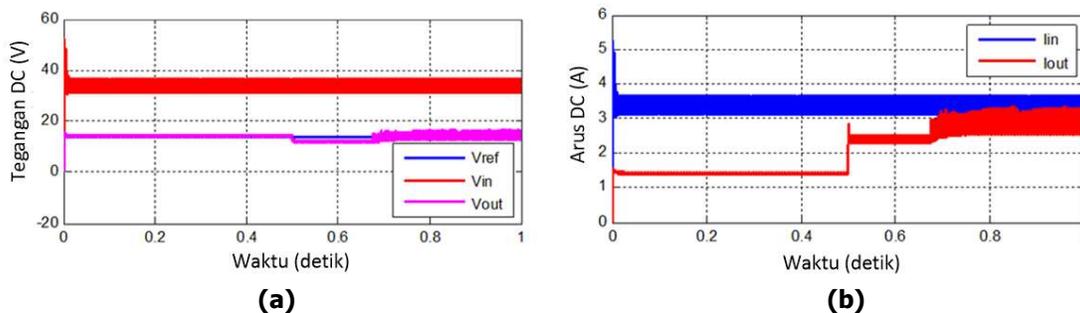
Gambar 12(a) menunjukkan tegangan AC yang dihasilkan oleh generator dengan amplitudo berubah mengikuti perubahan kecepatan turbin. Pada Gambar 12(b), daya keluaran konverter pertama (Pmppt) dengan logika fuzzy mampu menjejaki daya yang dihasilkan oleh penyearah (Pref) meskipun kecepatan turbin berubah acak. Gambar 12(c) menunjukkan tegangan DC yang dihasilkan pada konverter kedua (Vout) mampu mengikuti tegangan referensi (Vref) meskipun tegangan masukan konverter (Vin) berubah acak. Sama halnya dengan skenario kecepatan berubah, pada kondisi ini konverter kedua bekerja pada mode *buck-boost* dimana terjadi *overshoot* 28,57% saat terjadi perubahan mode *buck* ke *boost* maupun sebaliknya. Gambar 12(d) menunjukkan arus DC pada konverter kedua dimana arus keluaran (Iout) dapat dikendalikan pada 1,4 A meskipun arus masukan (Iin) berubah secara acak dan terdapat *overshoot*.

### 3.5 Pengujian dengan Perubahan Beban

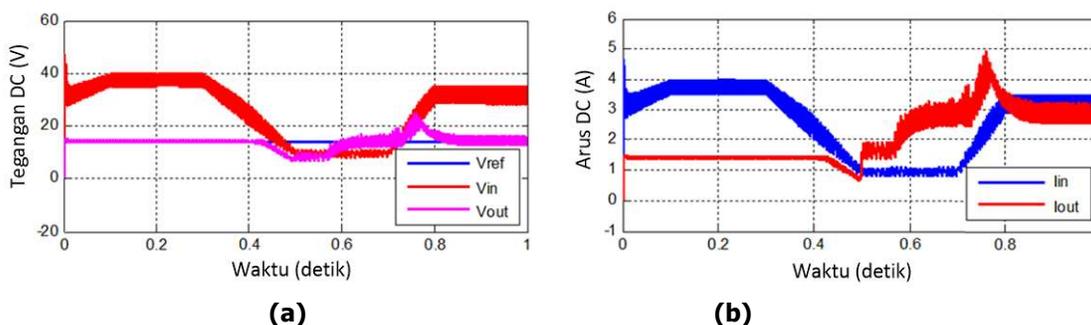
Pada skenario terakhir, sistem diuji dengan kondisi beban yang berubah dari 10 Ohm ke 5 Ohm seperti diilustrasikan pada Gambar 13. Pengujian dilakukan pada skenario kecepatan turbin konstan, berubah, dan acak dengan hasil dapat dilihat pada Gambar 14, Gambar 15, dan Gambar 16 berturut-turut.



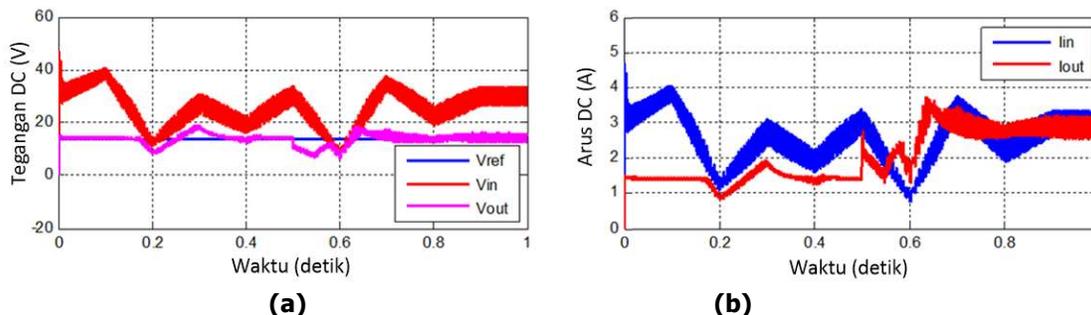
**Gambar 13. Beban Berubah dari 10 Ohm ke 5 Ohm**



**Gambar 14. Pengujian Beban Berubah dengan Kecepatan Konstan: (a) Tegangan DC pada Konverter Kedua, (b) Arus DC pada Konverter Kedua**



**Gambar 15. Pengujian Beban Berubah dengan Kecepatan Berubah: (a) Tegangan DC pada Konverter Kedua, (b) Arus DC pada Konverter Kedua**



**Gambar 16. Pengujian Beban Berubah dengan Kecepatan Acak: (a) Tegangan DC pada Konverter Kedua, (b) Arus DC pada Konverter Kedua**

Berdasarkan hasil pengujian, dapat dilihat bahwa pada Gambar 14(a) menunjukkan tegangan DC yang dihasilkan pada konverter kedua ( $V_{out}$ ) mampu mengikuti tegangan referensi ( $V_{ref}$ ) dengan tegangan masukan konverter ( $V_{in}$ ) konstan meskipun terdapat perubahan pada beban. Pada saat beban berubah terjadi *overshoot* 21,42% pada detik ke 0,5 s kemudian tegangan dapat kembali menuju 14 V. Gambar 14(b) menunjukkan arus DC pada konverter kedua dimana arus keluaran ( $I_{out}$ ) berubah naik ke 2,8 A saat beban berubah menjadi 5 Ohm.

Pada kondisi kecepatan berubah, dapat dilihat bahwa pada Gambar 15(a) menunjukkan tegangan DC yang dihasilkan pada konverter kedua ( $V_{out}$ ) masih mampu mengikuti tegangan referensi ( $V_{ref}$ ) meskipun terdapat perubahan pada beban dan tegangan masukan ( $V_{in}$ ) berubah. Pada saat beban berubah terjadi *overshoot* 33,33% pada detik ke 0,5 s kemudian tegangan dapat kembali menuju 14 V. Pada kondisi ini juga pengendali masih mampu membuat tegangan tetap di 14 V meskipun pada saat bersamaan tegangan masukan juga

berubah. Gambar 15(b) menunjukkan arus DC pada konverter kedua dimana arus keluaran ( $I_{out}$ ) berupaya untuk naik ke 2,8 A saat beban berubah menjadi 5 Ohm pada saat kondisi tegangan masukan berubah.

Pada skenario kecepatan acak, Gambar 16(a) menunjukkan tegangan DC yang dihasilkan pada konverter kedua ( $V_{out}$ ) mampu bertahan pada tegangan referensi ( $V_{ref}$ ) meskipun terdapat perubahan pada beban dan tegangan masukan berubah acak. Pada saat beban berubah terjadi *overshoot* 28,57% pada detik ke 0,5 s kemudian tegangan dapat kembali menuju 14 V. Pengendali masih mampu mempertahankan tegangan meskipun terjadi *overshoot* pada saat tegangan masukan berubah acak dan beban berubah. Gambar 16(b) menunjukkan arus DC pada konverter kedua dimana arus keluaran ( $I_{out}$ ) berupaya untuk naik ke 2,8 A saat beban berubah menjadi 5 Ohm pada saat kondisi tegangan masukan berubah acak.

#### 4. KESIMPULAN

MPPT logika fuzzy dengan pengendali PI sebagai penstabil tegangan untuk aplikasi pembangkit pikohidro telah berhasil dirancang dan diuji dengan berbagai skenario. Dua unit converter DC/DC tipe *buck-boost* dirancang secara serial untuk menghasilkan MPPT dan tegangan keluaran yang stabil. Hasil pengujian menunjukkan secara simulasi bahwa MPPT logika fuzzy mampu menghasilkan daya maksimal 167 Watt pada kecepatan turbin maksimal 600 RPM. Tegangan keluaran pada konverter kedua mampu dikendalikan oleh pengendali PI sebesar 14 V pada semua skenario dengan *overshoot* terbesar yaitu 33,33% pada saat terjadi perubahan kecepatan turbin sekaligus perubahan beban. Eksperimen perangkat keras akan dilakukan untuk memvalidasi hasil perancangan pada penelitian berikutnya.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bandung atas dukungan dana pada Penelitian Peningkatan Kapasitas Laboratorium dengan Nomor Kontrak: B/74.17/PL1.R7/PG.00.03/2021.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Abdellatif, W. S. E., Mohamed, M. S., Barakat, S., & Brisha, A. (2021). A Fuzzy Logic Controller Based MPPT Technique for Photovoltaic Generation System. *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*, 13(2), 394–417.
- Abdullah, Javed, A., Ashraf, J., & Khan, T. (2020). The impact of renewable energy on GDP. *International Journal of Management and Sustainability*, 9(4), 239–250.
- Acharya, P., Papadakis, A., & Shaikh, M. N. (2016). Modelling and Design of a 3 kW Permanent Magnet Synchronous Generator suitable for Variable Speed Small Wind Turbines. *MATEC Web of Conferences*, 55, 6–11.
- Aljarhizi, Y., Hassoune, A., & Al Ibrahim, E. M. (2019). Control Management System of a Lithium-ion Battery Charger Based MPPT algorithm and Voltage Control. *2019 International Conference on Optimization and Applications, ICOA 2019, June*, (pp. 1-

- 6).
- Assegaf, A., Aming, D., & Alvianto, F. (2021). Perancangan maximum power point tracking dengan algoritma incremental conductance untuk PLTS 100 Wp. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, Dan Listrik Tenaga)*, 1(1), 1–8.
- Ben Ali, R., Schulte, H., & Mami, A. (2017). Modeling and simulation of a small wind turbine system based on PMSG generator. *IEEE Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems, 2017-May*(October), (pp. 1-6).
- Chen, J., Yang, H. X., Liu, C. P., Lau, C. H., & Lo, M. (2013). A novel vertical axis water turbine for power generation from water pipelines. *Energy*, 54(November), 184–193.
- Djørup, S., Thellufsen, J. Z., & Sorknæs, P. (2018). The electricity market in a renewable energy system. *Energy*, 162, 148–157.
- Halimatussadiyah, A., Amanda, A., & Maulia, R. F. (2020). *Unlocking Renewable Energy Potential in Indonesia: Assessment on Project Viability*. July, 1–10.
- Jaya, V., & Sujono. (2018). Perancangan Maximum Power Point Tracking ( MPPT ) Pada Turbin Angin PMSG Kapasitas 300 Watt Dengan Algoritma Fuzzy. *Jurnal Maestro*, 1(2), 323–329.
- Kaouane, M., Boukhelifa, A., & Cheriti, A. (2016). Regulated output voltage double switch Buck-Boost converter for photovoltaic energy application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(45), 20847–20857.
- Karbakhsh, M., Abutorabi, H., & Khazaei, A. (2012). An enhanced MPPT fuzzy control of a wind turbine equipped with permanent magnet synchronous generator. *2012 2nd International EConference on Computer and Knowledge Engineering, ICCKE 2012*, (pp. 77–82).
- Karthi, K., Radhakrishnan, R., Baskaran, J. M., & Titus, L. S. (2019). Analysis of Adaptive MPPT Control Algorithm for Direct Driven Permanent Magnet Synchronous Generator. *Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control, ICPEDC 2019*, (pp. 140–145).
- Kerdtuad, P., Simma, T., Chaiamarit, K., & Visawaphatradhanadhorn, S. (2018). Establishment of a Pico Hydro Power Plant Using Permanent Magnet Synchronous Generator Supplied for AC Microgrid. *IEECON 2018 - 6th International Electrical Engineering Congress*, (pp. 1–4).
- Khan, U. H., Alam, Z., Ahmad, W., Khan, Z. A., Khan, R., & Ullah, Z. (2020). Backstepping based MPPT Control Technique for Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Energy Conversion System. *2020 3rd International Conference on Computing,*

- Mathematics and Engineering Technologies: Idea to Innovation for Building the Knowledge Economy, ICoMET 2020*, (pp. 1-7).
- Motwani, K. H., Jain, S. V., & Patel, R. N. (2013). Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants - A case Study. *Procedia Engineering*, 51(NUIcONE 2012), (pp. 721–726).
- Nicy, C. F., & Punitharaji, R. (2014). Isolated wind-hydro hybrid system using permanent magnet synchronous generator and battery storage with fuzzy logic controller. *Proceeding of the IEEE International Conference on Green Computing, Communication and Electrical Engineering, ICGCCEE 2014*, (pp. 634–641).
- Tiwari, R., & Babu, N. R. (2016). Fuzzy logic based MPPT for permanent magnet synchronous generator in wind energy conversion system. *IFAC-PapersOnLine*, 49(1), 462–467.
- Williamson, S. J., Griffo, A., Stark, B. H., & Booker, J. D. (2013). Control of parallel single-phase inverters in a low-head pico-hydro off-grid network. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, (pp. 1571–1576).
- Williamson, S. J., Stark, B. H., & Booker, J. D. (2013). Performance of a low-head pico-hydro Turgo turbine. *Applied Energy*, 102, 1114–1126.