

KENDALI TEGANGAN TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL DENGAN DC-DC BOOST KONVERTER

1,2,3,4) Dosen, Politeknik Negeri Banjarmasin, Banjarmasin, Indonesia, Jurusan Teknik Elektro

5) Dosen, Politeknik Negeri Tanah laut, Pelaihari, Indonesia, Jurusan Teknik Mesin

6) Dosen, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia, Jurusan Teknik Elektro

Corresponding email ²⁾ :
jazuli.fadil@poliban.ac.id

Received: 28.05.2022

Accepted: 25.10.2022

Published: 28.12.2022

©2022 Politala Press.
All Rights Reserved.

Khairunnisa ¹⁾, Jazuli Fadil ²⁾, Edi Yohanes ³⁾, Syaiful Rachman ⁴⁾,
Muhammad Khalil ⁵⁾, Antonius Rajagukguk ⁶⁾

Abstrak. Semua energi terbarukan, dan semua potensi yang ada saat ini terus di eksplorasi untuk menghadapi tantangan pemanasan global oleh para peneliti. Salah satunya adalah turbin angin. Paper ini membahas tentang kendali turbin angin sumbu vertikal tipe stand alone dengan kendali PID. Perkembangan teknologi turbin telah banyak dikembangkan dari sisi aerodinamis, generator, dan konfigurasi elektronika daya. paper ini akan dijelaskan tentang kendali turbin tipe standalone dengan kendali sederhana menggunakan kendali PID. Turbin angin rotor terhubung dengan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), dan DC-DC konverter. Kendali PID digunakan untuk mengendalikan duty cycle pada mosfet converter, sehingga dapat mempertahankan tegangan ketika kecepatan angin terus berfluktuasi. Pada simulasi menunjukkan bahwa PID mampu mempertahankan tegangan dengan nilai overshoot 4.2%, dan mencapai steady state 0.2 s.

Kata Kunci: Elektronika Daya, Konservasi Energi, PID, Smart Rotor, Turbin Angin

Abstract. All renewable energy and all the potential currently being explored to face the challenges of global warming by researchers around the world. One of them is a wind turbine. This paper discusses the control of a standalone vertical-axis wind turbine with a PID controller. Turbine technology has been widely developed regarding aerodynamics, generators, and power electronics configurations. We will explain the control of a standalone type turbine with a simple rule using a PID controller. The wind turbine rotor is connected to a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) and DC-DC converter. PID controller is used to controlling the converter MOSFET's duty cycle to maintain the voltage when the wind speed continues to fluctuate. The simulation shows that PID can maintain a voltage with an overshoot value of 4.2% and reaches a steady state of 0.2 s.

Keywords: Energy Conservation, PID, Power Electronic. Smart Rotor, Wind Turbine.

To cite this article: <https://doi.org/10.34128/je.v9i2.196>

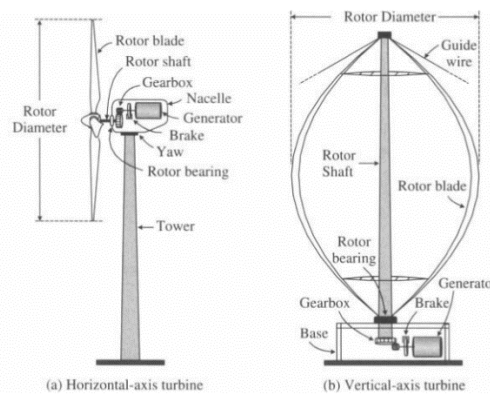
1. Pendahuluan

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) merupakan turbin angin yang tegak lurus vertikal dengan tanah, dimana generator bisa ditempatkan lebih rendah mendekati pondasi turbin / tanah, dan beroperasi sejajar dengan arah angin sehingga mampu beroperasi dari semua arah angin, dimana swept area VAWT ini tidak membutuhkan pengarah angin seperti halnya turbin angin sumbu horizontal. Swept area ini terdiri dari tinggi (blade) dan diameter rotor yang berfungsi untuk mengekstrak energi angin, dimana teknologi konvensional swept area pada umumnya bersifat tetap (fixed). Optimisasi kendali aerodinamis hanya pada perubahan sudut pitch [1][2], sebagai pembatas over wind speed. Sehingga dibutuhkan kendali saat kecepatan angin rendah ketika proses starting [3]. Sementara itu kecepatan angin cenderung dinamis yang diikuti oleh rotasi turbin untuk memutar generator, sehingga keluaran tegangannya pun juga dinamis. Untuk mengatasi permasalahan ini ada banyak metode yangtelah dikembangkan peneliti, diantaranya adalah kendali tegangan konstan menggunakan dengan gabungan Fuzzy- PID[4], makalah

tersebut menjelaskan tentang kendali tegangan dan reduksi ripple tegangan dengan metode tersebut dan berhasil mempercepat *steady state* menjadi 0.19%. Kemudian pengujian converter dengan emulator turbin angin menggunakan PMSG dengan kendali PI telah berhasil memperbaiki kualitas tegangan keluaran konverter [5]. Makalah ini membahas tentang kendali turbin angin sumbu vertikal tipe *stand alone* dengan kendali PID. Turbin angin rotor terhubung dengan PMSG, dan DC-DC konverter. Kendali PID digunakan untuk mengendalikan *duty cycle* pada mosfet *converter*, yang bertujuan untuk mempertahankan tegangan ketika kecepatan angin terus berfluktuasi.

Klasifikasi Turbin Angin

Angin merupakan salah satu energi terbarukan yang bisa menjawab tantangan pemanasan global. Energi angin bisa dikonversi menjadi energi listrik melalui turbin angin. Banyak lembaga dan peneliti yang telah melakukan pengamatan dalam peningkatan efisiensi dari turbin ini. Pada umumnya turbin angin ada dua kategori yaitu tipe sumbu horisontal atau *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)* dan tipe vertikal atau *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*. Pada sumbu horisontal orientasi dari sumbu putar parallel dengan tanah. Gambar 1 menunjukkan perbedaan mendasar untuk tipe turbin HAWT dan VAWT. Tabel 1 mencantumkan spesifikasi turbin angin berdasarkan klasifikasinya. Di lembaga Sandia National Laboratories dan Denmark Technical University telah melakukan investigasi pada turbin angin sumbu vertikal, Delft University of Technology bersama kedua institusi tersebut mengembangkan simulasi turbin sumbu vertikal Darrieus multi megawatt di lepas pantai dengan konsep terapung [6][7].



Gambar 1. Rotor turbin angin [8]

Tabel 1. Klasifikasi turbin angin (standard IEC 61-400)

<i>Wind Class</i>	<i>Annual Average Wind Speed</i>	<i>Turbulence Level</i>	<i>Extreme 50-Year Gust</i>
I A	High Wind Speed - 10 m/s	High Turbulence - 18%	High Gust - 70 m/s
I B	High Wind Speed - 10 m/s	Low Turbulence - 16%	High Gust - 70 m/s
II A	Medium Wind Speed - 8.5 m/s	High Turbulence - 18%	Medium Gust - 59.5 m/s
II B	Medium Wind Speed - 8.5 m/s	Low Turbulence - 16%	Medium Gust - 59.5 m/s
III A	Low Wind Speed - 7.5 m/s	High Turbulence - 18%	Low Gust - 52.5 m/s
III B	Low Wind Speed - 7.5 m/s	Low Turbulence - 16%	Low Gust - 52.5 m/s
IV	6.0 m/s	-	42 m/s

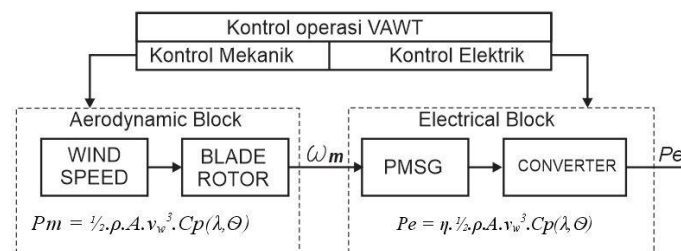
Untuk tipe *residence* atau *stand alone* juga terus dikembangkan seperti yang ditulis oleh M. Salman Siddiqui (IEEE 2014) tentang “*Optimized design of a straight blade urban roof top vertical axis wind turbine*”, yaitu pada turbin angin sumbu vertikal sangat efektif dipasang pada atap rumah (*small scale VAWT*) dengan tiga bilah tipe Darrieus [9]. Wei Liang menulis tentang “*Key technologies analysis of small scale non-grid-connected wind turbines: A review*”. Jurnal ini menjelaskan bagaimana optimasi bilah untuk meningkatkan kinerja VAWT [10].

Dari banyak penelitian sebelumnya yang telah dilakukan bisa disimpulkan bahwa VAWT memiliki banyak keunggulan dari HAWT, selain instalasinya mudah VAWT juga mampu menangkap angin dari semua arah

sehingga tidak perlu pengarah angin, untuk produksinya juga jauh lebih murah [11], untuk perawatan bisa lebih cepat karena generator bisa ditempatkan lebih dekat dengan tanah.

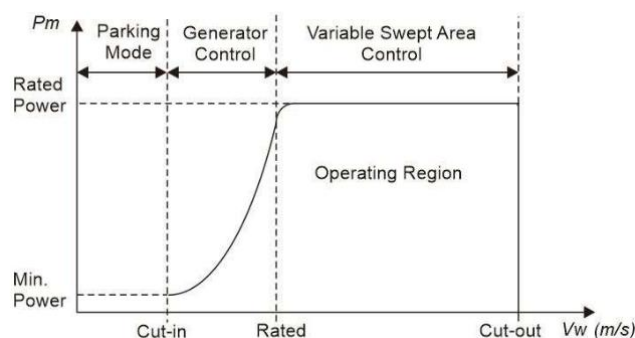
2. Tinjauan Pustaka

Kontrol turbin angin dikategorikan dalam *fixed-speed* dan *variable speed* turbin [8]. Untuk *fixed speed* turbin angin berputar pada kecepatan yang konstan, dimana maksimum energi yang dihasilkan hanya berada pada kecepatan angin tertentu, kelemahannya adalah efisiensi akan turun ketika berada pada kecepatan angin yang berbeda atau berfluktuasi. Sehingga daya yang dihasilkan cenderung tidak stabil. Sedangkan untuk *variable-speed*, turbin angin mampu menghasilkan energi maksimum dengan efisiensi yang bagus pada semua kecepatan angin, dimana turbin angin mampu mengontrol kecepatan putaran secara kontinyu pada kecepatan angin yang berbeda. Pada saat yang sama *tip speed ratio* (TSR), bisa dioptimalkan untuk mendapatkan daya maksimum pada kecepatan angin yang berbeda [12]. Keunggulan *variable-speed* turbin berikutnya adalah mengurangi stress mekanik, sisi lain kelemahannya adalah biaya manufaktur menjadi tinggi namun kompensasinya adalah produksi energi menjadi lebih tinggi. Gambar 2 menunjukkan konsep sistem kontrol VAWT yang dirancang dengan sistem *variable-speed*.



Gambar 2. Konsep sistem kontrol VAWT [13]

Gambar 3 menunjukkan tiga moda pengaturan turbin angin saat mulai bekerja, dari *cut-in* hingga *cut-off*. Diantaranya yaitu *parking mode*, dalam kondisi ini angin sangat rendah berada dibawah *cut-in* dan turbin belum menghasilkan torsi yang cukup untuk mengekstrak energi angin. Pengaturan berikutnya adalah *Generator-control mode*, dalam kondisi ini kecepatan angin berada di antara posisi *cut-in* menuju kecepatan nominal, dalam hal ini turbin dioperasikan dengan variable rotational speed untuk melakukan tracking daya maksimum di kecepatan angin yang berbeda. Terakhir adalah *cut-out mode*, dalam kondisi ini dari *cut-in* hingga *cut-out speed* daya yang dihasilkan akan dipertahankan konstan dengan pengaturan mekanisme *variable swept area* untuk meningkatkan efisiensi capturing daya maksimum di kecepatan angin yang berbeda.



Gambar 3. Region operasi kerja turbin angin [14]

Pada operasi kerja turbin, region 1 atau *start up* VAWT pada umumnya target turbin mampu *self start* dengan *cut-in wind speed* lebih cepat [15]. Operasi kerja VAWT terhadap kecepatan angin dibagi menjadi tiga region seperti yang di ditunjukkan pada Gambar 3, yaitu: Region 1 adalah saat kecepatan angin lebih rendah dari *cut-in wind speed*. Region 2 adalah posisi diantara *cut-in speed* dan *rated wind speed*, dimana turbin angin telah berhasil menghasilkan daya mekanik. Region 3 adalah antara *rating wind speed* dan *cut-out wind speed*. Beban penuh berada di region 3 dimana daya konstan di terapkan. Ketika berada di region 1, VAWT berada di C_p terendah untuk mulai beroperasi pada kecepatan angin rendah, posisi diameter rotor di atur pada diameter optimum, dengan *cut-in wind speed* berada di antara 1.5 m/s sd 2.5 m/s. VAWT pada umumnya beroperasi pada kecepatan angin rendah di 7.5 m/s (*wind class* IIIB, IEC) dengan *cut-in speed* yang kurang baik. Sehingga perlu dilakukan penelitian dampak perubahan variable diameter rotor VAWT terhadap perubahan kecepatan angin. Dari beberapa penelitian sebelumnya membuktikan bahwa peningkatan dimensi *swept area* mampu meningkatkan daya

maksimum, namun belum bisa meningkatkan start operasi turbin pada *cut-in speed* yang lebih cepat. Hal ini mendasari dugaan bahwa dengan perubahan variable diameter akan mempercepat *cut-in speed* VAWT [14], dengan melakukan *tracking variable* diameter optimum terhadap perubahan kecepatan angin.

3. Metode Penelitian

Kinerja turbin angin digambarkan oleh teori hukum Betz yang berlaku untuk turbin angin sumbu horisontal dan sumbu vertikal untuk keluaran daya maksimum berdasarkan formula Betz. Batas Betz atau “*The Betz Limit*” ini pertama kali diperkenalkan oleh insinyur Jerman Albert betz pada tahun 1919 dan terbitkan dalam bukunya: “*Wind Energie Und Ihre Ausnutzung Durch Windmuhlen*” atau “Energi Angin dan Ekstraksi Melalui Kincir Angin” yang diterbitkan pada tahun 1926. Teori yang dikembangkan berlaku untuk turbin angin sumbu horizontal dan vertikal. Gambar 4 memperlihatkan nilai aktual *power coefficient* (CP) maksimum untuk efisiensi turbin angin berdasarkan *betz limit* yaitu 59,3 %. Persamaan (1) dan (2) adalah perhitungan koefisien daya (Cp) turbin angin, yaitu pengukuran efisiensi turbin angin mengubah energi di angin menjadi listrik dengan membagi nilai daya listrik yang dihasilkan dengan energi total yang tersedia di angin.

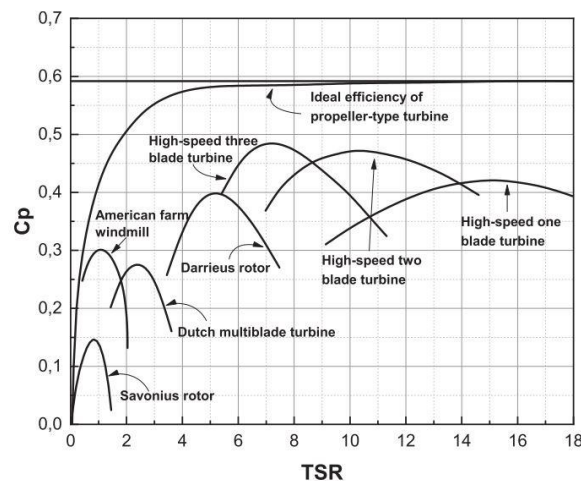
$$CP = \frac{\text{Electricity Produced by wind turbine}}{\text{Total Energy Available in the wind}} = \frac{Pt}{P} \quad (1)$$

$$CP = \frac{Pt}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3} \quad (2)$$

dimana ρ adalah kerapatan udara dalam kg/m^3 , A adalah *swept area* dalam m^2 , V^3 adalah kecepatan angin dalam m/s . Persamaan (3) menunjukkan persamaan *tip speed ratio* (TSR) atau kecepatan ujung bilah turbin (λ),

$$\lambda = \frac{2\pi R \cdot n}{V} = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (3)$$

dimana ω adalah kecepatan sudut putar dalam rad/s, R adalah radius turbin ketika berputar, n adalah kecepatan putar dalam Rpm , dan V adalah kecepatan angin dalam m/s .



Gambar 4. Effisiensi Turbin Angin [14]

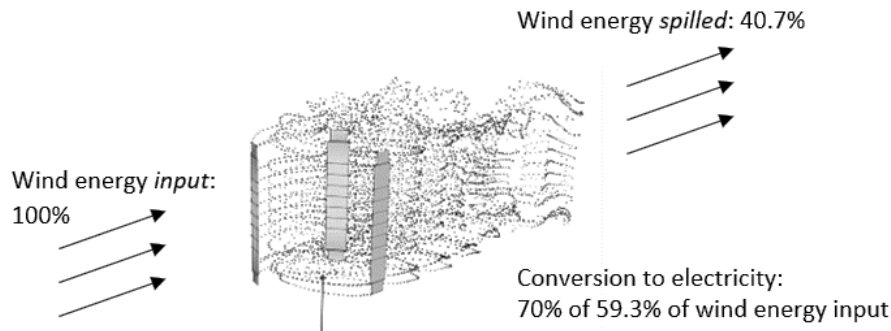
Teknologi turbin angin saat ini terus berkembang dan ada banyak penyempurnaan yang bisa di-lakukan. Kemampuan turbin angin untuk mengubah energi kinetik angin menjadi tenaga listrik dibatasi oleh beberapa faktor. Ini termasuk batas Betz (*betz limit*), faktor tersebut meliputi ketersediaan angin, swept area (luas sapuan bilah) dan kecepatan angin. Batas Betz menyatakan bahwa hanya 59,3% energi kinetik yang dapat diekstraksi sebelum stagnasi pada turbin berlangsung. Secara sederhana akan diperlihatkan pada Gambar 5.

Gambar 5 memperlihatkan, turbin pada VAWT mengekstrak energi sebesar 59.3% dalam batas Betz, sehingga energi angin yang hilang setelah melewati turbin 40.7 %, dengan asumsi Cp turbin angin ini adalah 0.59. Setelah memperhitungkan rugi-rugi generator, maka turbin angin ini mampu mengubah energi yang ada menjadi listrik sebesar 41%. Ini memperlihatkan nilai Cp turbin angin ini cukup bagus. Namun pada prakteknya sangat sulit turbin angin mendekati nilai maksimum betz limit dengan Cp 0.59.

Pembangkit listrik tenaga angin bekerja dengan memanfaatkan energi angin sebagai penggeraknya. Berdasarkan hukum kekekalan energi disebutkan energi tidak dapat diciptakan atau dihilangkan, energi hanya dapat berubah bentuk. Angin yang berhembus mengandung energi yang disebut energi kinetik. Jika kecepatan

angin berkurang maka energi kinetiknya berkurang, Pada turbin angin, angin yang mengenainya akan berkurang kecepatannya, dan diubah menjadi energi bentuk lain yaitu energi mekanik. Turbin yang dihubungkan dengan generator akan menghasilkan energi listrik. Jumlah energi kinetik (KE) bisa diketahui dengan persamaan (4) berikut,

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4)$$



Gambar 5. Konversi energi angin

Persamaan (5) adalah perhitungan untuk daya (P), yaitu massa udara yang bergerak pada kecepatan v melalui daerah sapuan bilah.

$$P = \frac{\text{Energy}}{\text{Time}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{mass}}{\text{Time}} \right) v^2 \quad (5)$$

Persamaan (6) adalah perhitungan laju aliran massa (\dot{m}), yang melewati sapuan bilah turbin atau *swept area* (A), yaitu produk dari kerapatan udara (ρ), kecepatan v , dan luas penampang *area* A .

$$\left(\frac{\text{Mass passing through } A}{\text{Time}} \right) = \dot{m} = \rho Av \quad (6)$$

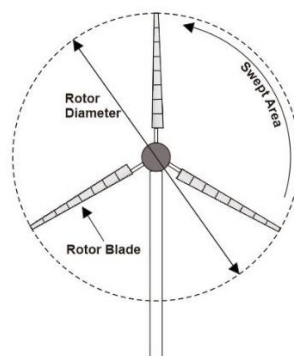
Persamaan (7) adalah substitusi persamaan (5) dan (6), menjadi sebagai berikut:

$$P_{\text{available}} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (7)$$

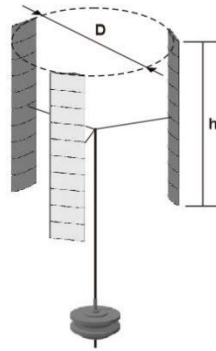
dimana $P_{\text{available}}$ adalah daya mekanik dari angin dalam watt, dengan kerapatan udara ρ dalam kg/m^3 , v^3 adalah kecepatan angin dalam m/s . A adalah *swept area* dalam m^2 , *swept area* mengacu pada area dari lingkaran bilah ketika bergerak melewati udara. Persamaan (8) adalah luasan *swept area* A dari HAWT sesuai ilustrasi pada Gambar 6.

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (8)$$

dimana parameter r adalah jari jari dalam m^2 .



Gambar 6. HAWT swept area [8]



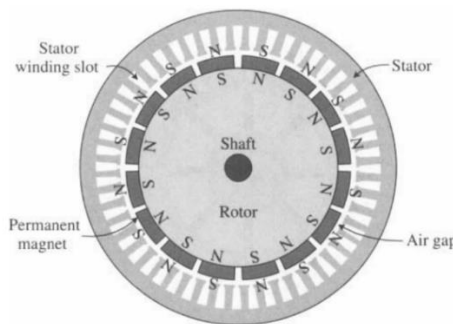
Gambar 7. VAWT swept area [8]

Sedangkan untuk VAWT tipe *straight blade* seperti pada gambar 7, *swept area* adalah tinggi bilah di kali diameter turbine. Persamaan (9) adalah perhitungan luas *swept area* VAWT *straight blade*.

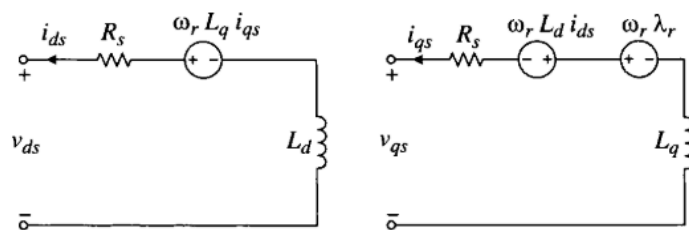
$$A=h.D \tag{9}$$

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Pada PMSG, fluks magnet rotor dihasilkan oleh magnet permanen dan tanpa brush (*brushless*). Generator ini tidak memiliki belitan rotor, sehingga tidak ada rugi-rugi belitan rotor yang mengurangi tegangan pada rotor [8][5]. Magnet permanen pada PMSG ini ditempatkan pada permukaan rotor dengan 16 magnet dipasang merata pada bagian permukaan inti rotor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. PMSG dengan konfigurasi 16 pole [14]



(a) Rangkaian *d-axis*

(b) Rangkaian *q-axis*

Gambar 9. Model sederhana dari PMSG pada sumbu *dq*

Model dinamik PMSG pada umumnya dinyatakan dengan rangkaian *dq axis* seperti pada Gambar 9, dimana arus medan dalam belitan rotor ditentukan sebagai arus konstan pada rangkaian sumbu *d*. Dari rangkaian tersebut persamaan tegangan generator ditentukan dengan persamaan (10) dan persamaan (11):

$$V_d = -i_d R_s - \omega \lambda_q + p \lambda_d \tag{10}$$

$$V_q = -i_q R_s + \omega \lambda_d + p \lambda_q \tag{11}$$

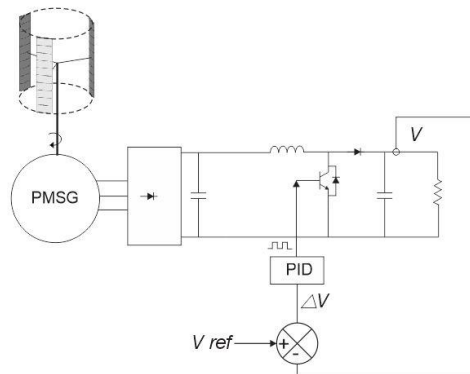
Dimana λ_d dan λ_q adalah flux stator sumbu *dq*, sedangkan i_d adalah arus stator pada sumbu *d*, i_q adalah arus stator pada sumbu *q*. R_s merupakan resistansi belitan, p adalah jumlah pole, dan ω adalah kecepatan putar PMSG (rad/s).

Konverter dan PID

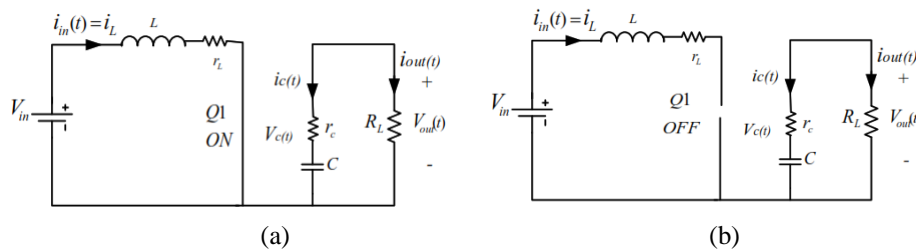
Untuk mempertahankan tegangan yang konstan pada kecepatan angin yang bervariasi, kontrol yang digunakan adalah *boost converter* dengan kendali PID. Rotor turbin terhubung ke PMSG seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10, keluaran PMSG adalah penyearah 3 fasa untuk mengubah tegangan AC menjadi DC kemudian terhubung ke konverter. Pada rangkaian elektronik daya diasumsikan bahwa komponen yang digunakan adalah ideal. DC-DC *boost converter* dengan kendali PID menghasilkan *duty cycle* dan melakukan *switching* (pensaklaran) pada IGBT(s) dengan periode tertentu berdasarkan desain kendali konverter [30]. *Duty cycle* ditentukan sebagai rasio antara waktu pensaklaran dan periode T_s . Persamaan (12) adalah perhitungan untuk rasio *duty cycle*, yaitu:

$$D_{cl} = \frac{T_{on}}{T_s} \cdot 100\% \tag{12}$$

Dimana T_{on} 'on' adalah saat pensaklaran transistor 'on', T_s adalah periode pensaklaran, dan D_{cl} adalah *duty cycle*. DC-DC *boost converter* memiliki keluaran tegangan DC yang lebih besar dari masukan tegangan DC. DC-DC *boost converter* dioperasikan dengan moda *intermittent* yang ditentukan dari arus induktor, dengan kontrol PWM menggunakan state "on" dan "off". Kondisi ini diperlihatkan pada Gambar 11.



Gambar 10. Diagram Boost converter



Gambar 11. (a) Boost Converter $0 < t < T_{on}$ (b) Boost Converter $T_{on} < t < T$

Ketika transistor dalam kondisi 'on', diode dalam kondisi *reverse bias*, sehingga tegangan dilepaskan dan disalurkan ke induktor. Ketika dalam kondisi 'off', diode dalam kondisi *forward bias*, energi dalam induktor dilepaskan menuju beban. Dimana keluaran tegangan lebih besar dari pada masukan tegangan. Tegangan induktor pada periode (T_s) adalah nol seperti yang ditunjukkan pada persamaan (13) berikut :

$$D_{cl} \cdot V_{dc} + (1 - D_{cl})(V_{dc} - V_{out}) = 0 \tag{13}$$

Dimana V_{dc} adalah tegangan masukan boost converter dari tegangan keluaran penyearah dan V_{out} adalah tegangan keluaran *boost converter*.

Masukan dan keluaran tegangan dapat di ekspresikan pada persamaan (14) sebagai berikut,

$$V_{out} = \frac{V_{dc}}{1 - D_{cl}} \tag{14}$$

Dimana D_{cl} adalah *duty cycle* konverter dengan rasio waktu "on" dan "off" dengan interval nilai digital antara 0 dan 1. Untuk daya yang disalurkan ke beban resistif dapat dihitung dengan persamaan (15) dan (16) sebagai berikut,

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{R_L} \quad (15)$$

$$P_{out} = \frac{V_{dc}^2}{(1-D_{cl})^2 R_L} \quad (16)$$

Dimana R_L adalah beban resistif.

Persamaan (17) adalah perhitungan Daya input (P_{in}), yaitu sama dengan daya output (P_{out}) dengan mengabaikan rugi-rugi konverter.

$$P_{in} = \frac{V_{dc}^2}{R_{in}} \cong P_{out} = \frac{V_{dc}^2}{(1-D_{cl})^2 R_L} \quad (17)$$

Dimana R_{in} adalah tahanan input boost converter. Untuk mempertahankan tegangan yang konstan digunakan kendali PID berdasarkan persamaan (18):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d(\tau) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (18)$$

dimana, K_p adalah *proportional gain*, K_i adalah *integral gain*, K_d adalah *derivative gain*, $e(t)$ adalah *error of system* dan τ adalah *integral variable*. Persamaan *transfer function* ditunjukkan pada persamaan (19) berikut:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (19)$$

Dimana s adalah frekuensi yang kompleks.

4. Hasil dan Pembahasan

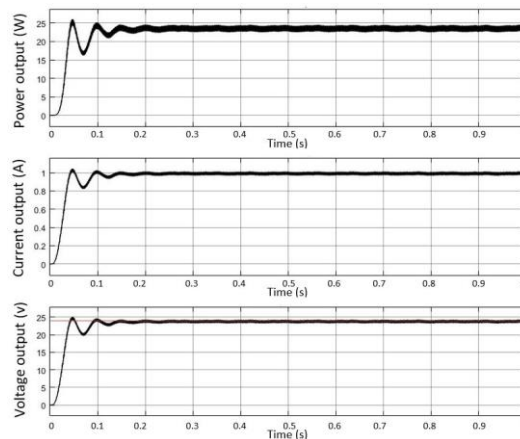
Turbin VAWT beroperasi pada kecepatan angin yang rendah dengan kecepatan rotor yang rendah, sehingga keluarannya perlu penguat yang disesuaikan dengan kebutuhan beban. Pada penelitian ini digunakan konverter boost DC-DC, yang bertujuan untuk menguatkan atau menaikkan masukan tegangan DC menjadi keluaran tegangan DC yang lebih besar. Dimana rangkaian ini terdiri masukan tegangan DC, kemudian kapasitor, diode, induktor, beban dan transistor untuk pensaklaran kendali tegangan. Untuk keluaran tegangan yang dihasilkan tergantung *duty cycle* dari PWM yang di proses transistor. Metode pensaklaran ini ditentukan untuk mendapatkan tegangan yang konstan pada kecepatan angin yang lebih lebar. *Switching duty cycle* di kontrol menggunakan PID yang di tanamkan dalam mikrokontroler. Rangkaian konverter boost pada turbin angin VAWT ditunjukkan pada Gambar 10. Konsep pensaklaran pada transistor atau mosfet dikendalikan dalam frekuensi tertentu dengan mode pensaklaran “on” dan “off”. Ketika saklar “on” atau tertutup, arus pada induktor akan naik secara linear, sehingga diode akan “off” pada *sequence* tersebut. Ketika saklar “off” atau terbuka, energi yang tersimpan pada induktor akan mengalir melalui diode menuju beban. Tabel 2 mencantumkan spesifikasi simulasi konverter yang dihasilkan.

Tabel 2. Spesifikasi Simulasi Konverter

Parameter	Nilai
Tegangan input min	5 V
Tegangan input max	12 V
Tegangan keluaran	24 V
Tegangan riak	0.10%
Daya keluaran max	500 W
Tegangan forward dioda	0.7 V
Frekuensi	30 kHz

Analisa input pengendali dan umpan balik menghasilkan respon transient yang diperlihatkan pada Gambar 12. Sistem menghasilkan overshoot dan beberapa osilasi terhadap respon waktu untuk menuju *steady state*. Untuk memperbaiki *overshoot system* dan *steady state error* digunakan kendali PID. Untuk parameter sistem kontrol tertutup ada beberapa indikator untuk menekan error, yaitu *rise time*, *overshoot*, *settling time*, dan *steady state error*. *Rise time* dibutuhkan konverter saat pertama kali starting sistem hingga mencapai tingkat yang diinginkan. *Overshoot* merupakan nilai puncak pengukuran dari *steady state*. *Settling time* adalah waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai *steady state*. Sementara itu *steady state error* adalah selisih antara keluaran *steady state* dan keluaran yang diinginkan atau referensi. Untuk kendali proportional digunakan untuk mempercepat *rise time*, kendali integral digunakan untuk meminimalkan error, dan derivative digunakan untuk mereduksi *overshoot*. Untuk menghasilkan keluaran dengan waktu respon yang cepat dan error yang kecil, maka ketiga aksi kontrol tersebut bisa dikombinasikan menjadi PID controller. Gambar 12 memperlihatkan umpan balik dari keluaran tegangan konverter dan dibandingkan dengan nilai referensi tegangan untuk meminimalkan error dengan kendali

PI. Pada pemodelan karakteristik VAWT memperlihatkan bahwa saat kecepatan angin mencapai 12 m/s daya optimumnya adalah 480 Watt pada kecepatan turbin 280 Rpm. Pada kecepatan angin yang konstan di 12 m/s tersebut, dengan mengabaikan rugi-rugi mekanik, keluaran PMSG adalah 12 V_{ac}, kemudian disearahkan melalui rectifier menjadi 12 V_{dc}, keluaran penyearah atau rectifier ini menjadi input boost konverter. Simulasi rangkaian tertutup konverter ini menggunakan kendali PI untuk menekan nilai error mendekati nol dan memperbaiki transient respon konverter.



Gambar 12. Simulasi Boost Converter

5. Kesimpulan

Gambar 12 menunjukkan referensi tegangan adalah 24 volt dengan puncak overshoot 4.2%, dimana *rise time* adalah 0.042 sec dan *peak time* adalah 0.048 sec dan mencapai *steady state* di 0.2 sec. Kesimpulan sistem menunjukkan *boost converter* dengan kendali PID menghasilkan regulator tegangan yang cukup baik dengan settling time 0.15 sec. Ini bisa diamati pada Gambar 12, dimana tegangan keluaran stabil konstan di 24 volt dalam waktu yang singkat. Untuk *tuning* kendali PI dilakukan dengan *trial and error*.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan - Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat - Direktorat Jenderal Pendidikan Vokasi - Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi yang sejak tahun pertama hingga tahun ketiga telah memberikan bantuan pendanaan dan dukungan lainnya hingga kegiatan Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat ini bisa terlaksana sebagaimana mestinya. Tak lupa kami sampaikan terimakasih kepada Politeknik Negeri Banjarmasin atas segala dukungan yang diberikan, dan terimakasih juga kepada Politeknik Negeri Tanah Laut atas kontribusi dan dukungannya, semoga capaian dari kegiatan ini dapat memberikan kontribusi yang positif bagi kemajuan institusi dan masyarakat.

Daftar Pustaka

- [1] T. L. Van and T. Hai, "Advanced Pitch Angle Control Based on Fuzzy Logic for Variable-Speed Wind Turbine Systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 7, no. 3, pp. 259–266, 2013.
- [2] Y. Guo, X. Li, L. Sun, Y. Gao, Z. Gao, and L. Chen, "Aerodynamic analysis of a step adjustment method for blade pitch of a VAWT," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 188, no. October 2018, pp. 90–101, 2019.
- [3] S. Watson *et al.*, "Future emerging technologies in the wind power sector: A European perspective," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 113, no. June, p. 109270, 2019.
- [4] D. K. Setiawan, M. Ashari, H. Suryoatmojo, and W. Cahyadi, "Combined error adaptive fuzzy-PI for reducing DC voltage ripple in three-phase SPWM boost rectifier under unbalanced DGs system," *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 384–396, 2020.
- [5] M. Ashourianjozdani, L. A. C. Lopes, and P. Pillay, "Power Electronic Converter Based PMSG Emulator: A Testbed for Renewable Energy Experiments," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 4, pp. 3626–3636, 2018.
- [6] B. Roscher, "Structural Optimization Of A Vertical Axis Wind Turbine With Aeroelastic Analysis," *M.Sc. Thesis - Delft Univ. Technol.*, no. June, 2014.
- [7] W. Tjiu, T. Marnoto, S. Mat, M. H. Ruslan, and K. Sopian, "Darrieus vertical axis wind turbine for power generation II: Challenges in HAWT and the opportunity of multi-megawatt Darrieus VAWT development," *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 560–571, 2015.
- [8] B. wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, "Power Conversion and Control Of Wind Energy Systems," in *IEEE Press*, 2011, pp. 1–453.
- [9] M. S. Siddiqui and S. M. Hasan, "Optimized design of a straight blade urban roof top vertical axis wind

- turbine,” in *2014 International Conference on Energy Systems and Policies, ICESP 2014*, 2015.
- [10] W. Liang and W. Liu, “Key technologies analysis of small scale non-grid-connected wind turbines: A review,” in *Proceedings of 2010 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, WNWEC 2010*, 2010, pp. 68–73.
- [11] R. Howell, N. Qin, J. Edwards, and N. Durrani, “Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine,” *Renew. Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 412–422, 2010.
- [12] E. Hau, “Wind turbines: Fundamentals, technologies, application, economics,” in *Springer Press*, 2013, pp. 1–879.
- [13] G. Abdalrahman, W. Melek, and F. S. Lien, “Pitch angle control for a small-scale Darrieus vertical axis wind turbine with straight blades (H-Type VAWT),” *Renew. Energy*, vol. 114, pp. 1353–1362, 2017.
- [14] J. Fadil, Soedibyo, and M. Ashari, “Performance Analysis of Vertical Axis Wind Turbine with Variable Swept Area,” *Int. Semin. Intell. Technol. Its Appl.*, pp. 217–221, 2017.
- [15] J. Fadil, “Smart Variable Rotor of Vertical Axis Wind Turbine with Faster Cut-in speed and Wide Range Extract Power Using Artificial Intelligent,” vol. 13, no. 6, 2020.