

SISTEM KONTROL SUDUT PITCH BILAH TURBIN ANGIN MENGUNAKAN LOGIKA FUZZY UNTUK VARIABLE SPEED VERTICAL AXIS WIND TURBINE (VAWT)

Mohammad Noor Hidayat¹⁾, Hasanuddin^{*1,2)}, Sapto Wibowo¹⁾

¹⁾Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Malang, Indonesia

²⁾ Teknik Elektro, Politeknik Negeri Banjarmasin, Banjarmasin, Indonesia

e-mail: moh.noor@polinema.ac.id, sandin210707@poliban.ac.id, sapto.wibowo@polinema.ac.id

Diterima: 1 Juni 2022 – Direvisi: 6 Juni 2022 – Disetujui: 6 Juni 2022

ABSTRACT

VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) is a turbine that has an upright mechanical structure with its blades rotating toward a perpendicular z-axis. Based on the experimental results, it is found that there is a relationship between the rotational speed of turbine that rotates generator with the output voltage and power. Thus, it is necessary to control the wind turbine speed so it can rotate according to the set point to be achieved. The contribution of this research is the development of a Fuzzy logic-based control system to control the speed of VAWT turbine where the speed of turbine is used as feedback. To design a Fuzzy rule base, the characteristics of the wind turbine's response to wind speed are investigated first. Then Fuzzy logic-based controller is created and implemented. To test the effectiveness of the Fuzzy controller made, the implementation is carried out on a VAWT turbine while the simulation is applied to PMSG model using wind turbine through Simulink/Matlab. Based on simulation and experiment results, the performance of the control system using Integral Absolute Error (IAE) for each turbine speed set point value (35, 45, 85, and 100 RPM), it is found that for a small set point value, the IAE value will be larger than higher setpoints. The percentage of the average IAE value for the simulation is 10.25% higher than the experiment. It further shows that the control turbine speed at low speeds is relatively more difficult than at higher speeds.

Keywords: fuzzy logic control, pitch angle control, wind turbine speed, variable speed VAWT.

ABSTRAK

Turbin angin sumbu vertikal memiliki struktur mekanik tegak ke atas dengan bilah-bilah turbin yang berputar terhadap sumbu-z tegak lurus. Berdasarkan hasil percobaan diperoleh hubungan antara kecepatan putaran turbin yang memutar generator dengan keluaran tegangan dan daya yang dihasilkan, sehingga diperlukan upaya mengendalikan kecepatan turbin angin sesuai kecepatan yang diinginkan. Kontribusi dari penelitian ini berupa pengembangan sistem kontrol berbasis logika Fuzzy untuk mengendalikan kecepatan turbin VAWT dengan hanya menggunakan umpan balik kecepatan turbin angin. Karakterisasi respon turbin angin terhadap kecepatan angin dilakukan terlebih dahulu dalam perancangan rule base (aturan) Fuzzy. Selanjutnya sistem turbin VAWT direalisasikan untuk mengimplementasikan kontrol berbasis logika Fuzzy yang diusulkan, sedangkan untuk simulasinya menggunakan model PMSG turbin angin pada Simulink/Matlab. Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen dengan mengukur kinerja respon sistem kontrol menggunakan Integral Absolut Error (IAE) untuk nilai-nilai setpoint dengan kecepatan turbin 35, 45, 85, dan 100 RPM, maka diperoleh bahwa apabila nilai setpoint kecil maka nilai IAE akan semakin besar dibandingkan dengan nilai IAE setpoint yang lebih tinggi. Persentase nilai rata-rata IAE untuk simulasi adalah 10.25% lebih tinggi dibandingkan dengan eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian kecepatan turbin untuk kecepatan relatif lebih rendah akan lebih sulit dikendalikan dibandingkan pada saat kecepatan turbin lebih tinggi.

Kata Kunci: kontrol logika fuzzy, kontrol sudut pitch, kecepatan turbin angin, variable speed VAWT.

I. PENDAHULUAN

PEMBANGKIT energi tenaga angin memiliki potensi yang cukup besar untuk dikembangkan di Indonesia. Hal ini didukung oleh Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. Berdasarkan data yang dikumpulkan kementerian ESDM, diperoleh bahwa bahwa target kapasitas PLT-Angin pada tahun 2025 adalah 255 MW, namun demikian, capaian target di tahun 2020 untuk pembangkit yang baru terpasang masih 60% [1]. Dengan adanya rencana PLN yang akan menggandeng French *Energy Department* untuk pengembangan pembangkit energi ini di Banten, setidaknya akan meningkatkan target capaian dalam pembangkitan energi tenaga angin di Indonesia [1]. Selain pengembangan pembangkit energi, penelitian-penelitian terkait pembangkit jenis ini juga terus dikembangkan. Berdasarkan hasil survei terhadap topik penelitian tentang pembangkit energi tenaga angin (atau dikenal juga dengan tenaga bayu) dalam beberapa tahun terakhir, terdapat ratusan judul penelitian dengan topik tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian dalam topik ini cukup pesat. Salah satu diantaranya adalah pembangkit listrik tenaga bayu dengan turbin angin sumbu vertikal atau selanjutnya disebut *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dimana arah putaran turbin ini berbeda dengan arah putaran turbin standar yang berputar secara horizontal.

Salah satu persoalan yang muncul dalam turbin jenis VAWT ini adalah persoalan kecepatan putaran yang dapat berputar terlalu cepat akibat hembusan angin yang keras. Hal ini dapat merusak VAWT itu sendiri ataupun menurunkan performa keluaran daya yang dihasilkan. Untuk mengatasi hal tersebut, kecepatan rotor dari turbin yang terhubung dengan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) perlu dikontrol untuk menghindarkan VAWT berputar diluar dari kecepatan yang dibolehkan. Sebagai pengaman, PMSG turbin angin telah dirancang pabrikan agar apabila kecepatan turbin angin terlalu cepat maka tegangan dan daya listrik yang dihasilkan akan turun. Berdasarkan hasil pengujian terhadap kinerja PMSG yang diuji dalam kecepatan rendah sampai tinggi. Tegangan dan keluaran daya yang dihasilkan kemudian diukur dan disajikan dalam bentuk hubungan antara tegangan dan daya keluaran terhadap kecepatan putarnya.

Dalam literatur sebelumnya, penelitian terkait turbin VAWT telah dilakukan, diantaranya oleh Fadil et al [2],[3],[4], Chan et al [5], Purbaya et al [6], dan Ramadhani [7]. Fadil et al [2],[3],[4] mengembangkan VAWT dengan fokus utamanya adalah untuk peningkatan performa serapan energi melalui perbaikan sistem mekanik *variable swept area*. Mekanisme yang dibuat melalui penggunaan panjang bilah dan diameter turbin yang dapat diubah (*extendable diameter and blade*). Sebaliknya, Chan et al [5] melakukan optimalisasi terhadap bentuk bilah dengan menggunakan algoritma genetik sedangkan Purbaya et al [6] mengembangkan *prototype* turbin VAWT model Savonius dengan membuat variasi tertutup dan terbuka. Selanjutnya Ramadhani [7] merancang VAWT dengan Sudu Naca 0021 dengan tujuan untuk mencari model turbin angin yang mampu menghasilkan daya yang paling besar pada *Tip Speed Ration* (TSR) yang rendah. Berdasarkan dari hasil penelitian-penelitian tersebut, hanya sedikit dibahas tentang pengontrolan kecepatan VAWT padahal kecepatan angin yang tidak menentu mempunyai pengaruh signifikan terhadap turbin VAWT.

Dari penelitian [3],[4],[8], pengontrolan ditujukan untuk mengendalikan keluaran daya yang konstan dengan menggunakan kecepatan angin dan keluaran daya yang dihasilkan sebagai umpan balik. Namun karena kecepatan angin ini sulit diprediksi karena nilainya berubah-ubah maka hal ini membuat dinamika sistemnya juga ikut berubah. Penerapan logika Fuzzy untuk memprediksi kecepatan angin ini dilakukan untuk menganalisa hubungan antara input dan output tersebut. Karena variabel yang ingin dikontrol diperoleh dari sistem mekanis (kecepatan, torsi) dan sistem elektris (tegangan, arus), maka penggunaan keluaran daya secara langsung sebagai umpan balik akan mengabaikan hubungan dinamika kedua sistem tersebut. Untuk itu, dalam penelitian ini diusulkan pengendalian kecepatan turbin dengan cara mengubah sudut *pitch* bilah berdasarkan masukan kecepatan angin dan kecepatan turbin dengan asumsi bahwa kecepatan angin diketahui. Dari studi ini diharapkan dapat memberikan struktur kontrol yang lebih baik dalam pengontrolan turbin VAWT yang lebih baik. Kontribusi dari penelitian ini adalah pengembangan metode kontroler untuk mengendalikan kecepatan turbin angin berdasarkan umpan balik kecepatan putaran turbin dan kecepatan angin agar kecepatan putaran turbin angin dapat mengikuti nilai setpoint yang diberikan.

II. METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian ini meliputi: pemodelan turbin angin VAWT termasuk pengujian karakteristik PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) serta pengujian sudut *pitch* turbin VAWT terhadap kecepatan angin. Selanjutnya perancangan sistem controller berbasis logika *fuzzy* untuk mengendalikan kecepatan turbin dan implementasi rancangan controller pada turbin angin VAWT melalui simulasi dan eksperimen dilakukan. Kemudian evaluasi kinerja dari controller yang diajukan dilakukan untuk mengetahui efektivitas controller yang digunakan. Ada 2 subsistem yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu: model turbin angin sumbu vertikal (VAWT) dan sistem kontrol sudut *pitch* berbasis logika *fuzzy*. Rancangan controller dibuat untuk mengendalikan kecepatan turbin VAWT pada kecepatan angin dalam kisaran 2–6.7 m/s. Implementasi sistem dilakukan dalam simulasi menggunakan program Matlab/Simulink sedangkan eksperimen dilakukan dengan merealisasikan turbin angin VAWT yang diuji coba dalam skala lab. Dalam pengujian, *blower* digunakan sebagai simulasi hembusan angin dalam kecepatan angin yang diinginkan dengan cara memposisikan *blower* pada jarak tertentu dari turbin serta pengukuran kecepatan angin yang dihasilkan menggunakan anemometer.

A. Turbin Angin VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*)

1) Model dinamis turbin VAWT

Persamaan model turbin angin dapat diberikan oleh Persamaan 1 berikut [9].

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \quad (1)$$

dimana A adalah *swept area* (m^2), ρ adalah kerapatan udara (kg/m^3), sedangkan v_w adalah kecepatan angin (m/s). Namun hanya sebagian kecil dari besaran daya persamaan (1) tersebut yang dapat diserap oleh turbin angin,

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2)$$

dimana β adalah sudut *pitch*, sedangkan λ adalah *tip speed ratio* (TSR) dimana:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_w} \quad (3)$$

dengan ω_r dan R masing-masing adalah kecepatan sudut putar turbin (rad/s) dan jari-jari putaran turbin angin. Pada persamaan (2), $C_p(\lambda, \beta)$ merupakan koefisien performa daya yang dirumuskan oleh persamaan [10],[11],[12],[13],[14]:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (4)$$

dimana $C_1 = 0.5, C_2 = 116, C_3 = 0.4, C_4 = 5, C_5 = 21$, dan $C_6 = 0$, sedangkan

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

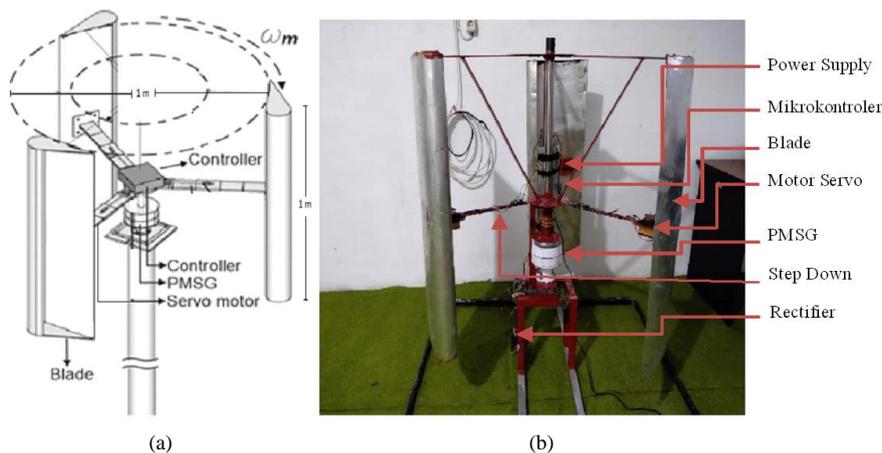
2) Rumusan kecepatan poros turbin

Dalam pengontrolan kecepatan rotasi turbin digunakan kecepatan turbin sebagai umpan baliknya. Untuk pengukuran kecepatan putaran poros turbin digunakan sejumlah magnet dan sensor *hall effect* dalam perhitungan kecepatan putaran poros turbin yang diberikan sebagai berikut.

$$RPM = \left(\frac{n}{N} \right) \times 60 \quad (6)$$

TABEL 1
 SPESIFIKASI TURBIN ANGIN

Parameter	Nilai (Satuan)
Daya mekanik turbin	600 (Watt)
Jumlah bilah	3 (bilah)
Diameter Turbin	1 (meter)
Bahan bilah	Aluminium
Tinggi bilah	1 (meter)
Aktuator	Motor servo
Tipe bilah	<i>Airfoil</i>



Gambar 1. Desain VAWT [2] (a) dan prototipe VAWT skala laboratorium (b).

dimana *Revolution Per Minute* (RPM) merupakan ukuran dari seberapa banyak putaran poros berputar dalam satu menit, n adalah banyaknya pulsa yang terbaca setiap detik, sedangkan N adalah jumlah pulsa dalam satu lingkaran penuh (1 *revolution*). Persamaan (6) dapat diuraikan sebagai berikut:

$$RPM = \left(\frac{Pulse \times sec^{-1}}{Pulse \times Rev^{-1}} \right) \times \frac{sec}{min^{-1}} = \frac{Rev}{min} \quad (7)$$

Ukuran *RPM* ini dapat diubah kedalam satuan rad/s dengan menggunakan hubungan bahwa 1 Rev = 2π , demikian pula sebaliknya.

3) Desain prototipe turbin angin VAWT

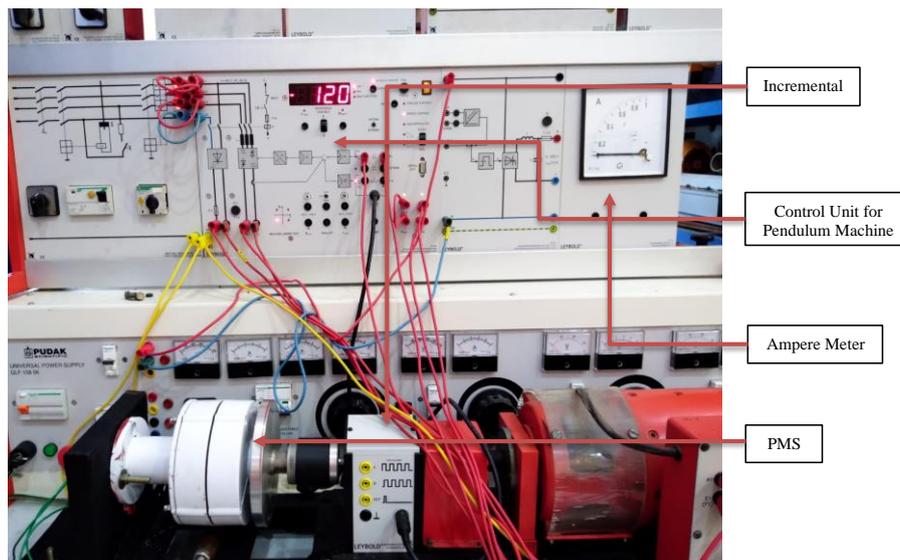
Desain dan prototipe VAWT sebagaimana diberikan pada Gambar 1 yang terdiri dari tiga buah bilah (*blade*), kontroler untuk mengendalikan putaran servomotor, PMSG sebagai generator pembangkit listrik, dan servomotor sebagai aktuator untuk mengubah sudut bilah turbin angin.

Spesifikasi turbin angin yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1. Turbin angin sumbu vertikal yang dirancang pada penelitian ini memiliki daya mekanik sebesar 600 W dengan 3 buah bilah (*blade*) berbahan dasar aluminium. Tinggi masing-masing bilah dimaksud adalah setinggi 1 m bertipe *airfoil naca 0012* dengan dimensi panjang *chord* 0.3 m dengan ketebalan bilah 0.04 m. Peneliti membangun prototipe VAWT berdiameter 1 m dengan motor servo sebagai aktuatornya.

4) Pengujian karakteristik PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) dan turbin VAWT

Karakteristik hubungan antara keluaran tegangan dan kecepatan putaran turbin angin menggunakan PMSG dapat dilakukan untuk melihat hubungan antara kecepatan putaran dengan tegangan dan daya yang dihasilkan. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, pengujian dilakukan dengan menggunakan *incremental tacho* untuk mengukur kecepatan, unit kontrol untuk memutar PMSG, sedangkan amperemeter dan voltmeter digunakan untuk mengukur arus dan tegangan keluaran.

Dengan menghubungkan keluaran daya PMSG dengan daerah operasi turbin angin [2],[15] maka diperlukan suatu pengontrolan untuk mengendalikan kecepatan sudut putaran PMSG sedemikian rupa sehingga kecepatan sudut tidak melampaui batas kecepatan sudut PMSG tersebut. Spesifikasi PMSG yang



Gambar 2. Setup pengujian karakteristik PSMG (*Permanent Synchronous Motor Generator*)



Gambar 3. Testbed pengujian sudut *pitch* VAWT terhadap kecepatan angin

dipakai pada penelitian ini memiliki daya sebesar 500 W dengan tegangan DC output maksimal sebesar 16.5 V. PMSG yang dipakai memiliki RPM maksimal sebesar 120 RPM.

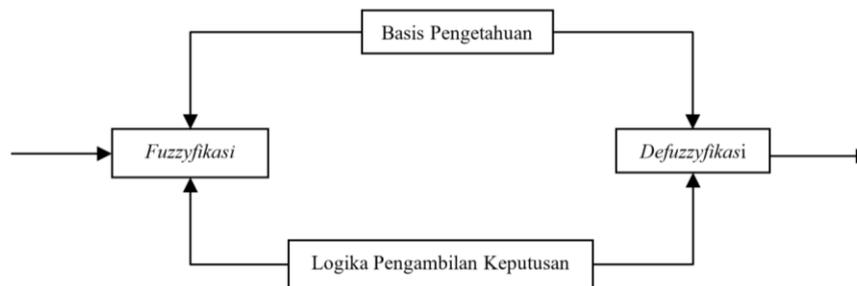
Untuk penerapan kecepatan angin yang diinginkan dalam eksperimen digunakan sebuah anemometer untuk mengukur kecepatan angin dari *blower*, yaitu dengan memposisikan *blower* pada jarak tertentu dari turbin angin. Pengujian dilakukan untuk beberapa kecepatan angin, yaitu 2 m/s, 3.5 m/s, dan 5 m/s. Selanjutnya, dalam setiap skenario kecepatan angin dilakukan penyetingan variasi sudut bilah turbin angin mulai dari 0° sampai 40° kemudian masing-masing kecepatan turbin angin dan keluaran tegangan diambil datanya.

Hubungan antara koefisien daya dan TSR diberikan oleh [10] dimana semakin kecil sudut *pitch* maka koefisien daya yang dihasilkan semakin besar. Sebaliknya, jika sudut *pitch* besar, maka koefisien daya yang dihasilkan semakin kecil. Dalam pengontrolan turbin angin pada penelitian sebelumnya mengikuti hubungan antara kecepatan angin dan keluaran daya yang dihasilkan sebagaimana dijelaskan dalam [15],[16].

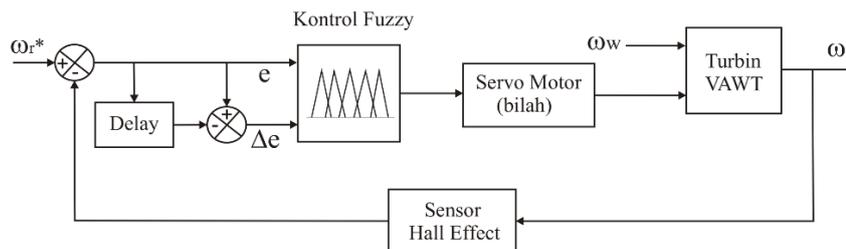
Pengujian terhadap turbin angin yang ditiup oleh *blower* sebagai skenario tiupan angin dilakukan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Pengujian ini dilakukan untuk melihat respon turbin terhadap keluaran tegangan dan kecepatan putarannya. Semakin dekat dengan turbin maka kecepatan angin semakin tinggi, demikian pula sebaliknya.

B. Kontrol berbasis logika fuzzy

Ketidakpastian model dan preferensi yang meliputi variabel input yang diperlukan dalam perhitungan dapat diatasi dengan metode logika *Fuzzy*. Penalaran dan preferensi di antara nilai lebih atau kurang



Gambar 4. Diagram struktur dasar logika fuzzy



Gambar 5. Struktur kontrol kecepatan turbin angin menggunakan Logika Fuzzy

dapat diterima dalam nilai-nilai berorientasi keputusan. Sistem kerja untuk menghadapi ketidakpastian ketika informasi yang tersedia tidak pasti dapat diwakili aturan *Fuzzy*. Pada Gambar 4 ditunjukkan bagian-bagian struktur dasar logika *Fuzzy* [17] yang dapat di jelaskan sebagai berikut.

1) *Fuzzyfikasi*

Fuzzyfikasi ialah cara mengganti bilangan *non-Fuzzy* menjadi bilangan *Fuzzy*. Bilangan dan masukan-masukan yang sedang dalam wujud variabel numerik yang sudah dikuantisasi sebelum diolah oleh kontrol *Fuzzy* wajib diganti terlebih dulu ke dalam bilangan *Fuzzy*.

2) *Basis Pengetahuan*

Basis pengetahuan berperan dalam mendeskripsikan himpunan- himpunan *Fuzzy* dari daerah masukan serta daerah keluaran, agar bisa dipakai oleh variable linguistik sebagai dasar aturan kontrol. Pendefinisian himpunan *Fuzzy* umumnya dicoba dengan cara individual dengan menggunakan pendekatan *heuristic*, serta didasarkan pada pengalaman serta estimasi yang menyangkut teknik merekayasa variabel, dalam hal ini sangat bergantung pada pembuat sistem.

3) *Logika Pengambilan Keputusan*

Logika pengambilan keputusan menggunakan dua mekanisme penalaran yaitu metode implikasi dan metode inferensi.

4) *Defuzzyfikasi*

Defuzzyfikasi merupakan proses kebalikan dari *fuzzyfikasi*. Hasil keluaran keputusan yang diperoleh dengan cara penalaran yang masih dalam bilangan *Fuzzy* dan berbentuk nilai derajat keanggotaan. Derajat keanggotaan ini wajib diganti kembali menjadi variabel numerik *non-fuzzy* lewat cara *defuzzyfikasi*.

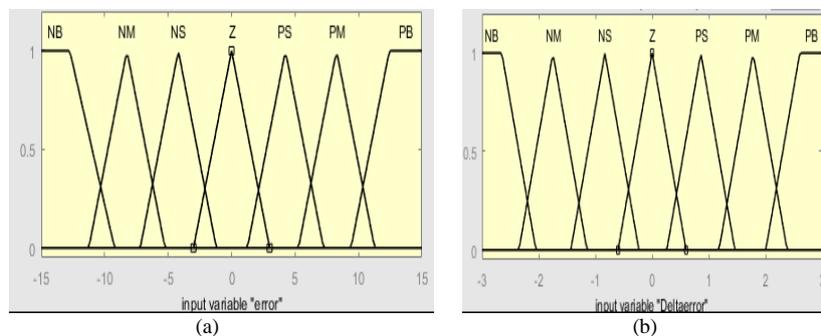
Dalam perancangan kontroler untuk mengendalikan kecepatan turbin angin digunakan umpan balik berupa kecepatan turbin angin dan kecepatan angin. Untuk mengukur kecepatan turbin digunakan magnet germanium yang disusun secara melingkar dan sebuah *sensor hall effect* pada bagian atas magnetnya. Apabila turbin berputar akan membuat keluaran sensor hall effect menghasilkan pulsa.

Tabel 2
 Basis Aturan Logika Fuzzy

Output	Error							
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	
Delta Error	PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	
	PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	
	PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	
	Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	
	NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	
	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	

Tabel 3
 Fungsi Keanggotaan

Notasi	Fungsi Keanggotaan	Error	Delta Error	Sudut Pitch (°)
NB	Negative Big	-120-9.2	-3-(-2.05)	0-6.4
NM	Negative Medium	-11.2-(-5.2)	-2.34-(-1.14)	5-12
NS	Negative Small	-7.2-(-1.2)	-1.43-(-0.23)	10.4-17.5
Z	Zero	-3-3	-0.6-0.6	16.3-23.4
PS	Positive Small	1.2-7.2	0.26-1.46	22.2-29.1
PM	Positive Medium	5.5-11.2	1.18-2.38	27.6-34.8
PB	Positive Big	5.2-120	2.00-5.23	33.2-40



Gambar 6. Fungsi keanggotaan untuk masukan berupa error (a) dan delta error (b)

Struktur kontrol kecepatan turbin angin menggunakan Logika Fuzzy dapat digambarkan sebagaimana Gambar 5. Dalam struktur tersebut umpan balik kecepatan turbin angin dan setpoint kecepatan turbin angin digunakan untuk membentuk error dan delta error dimana sensor hall effect digunakan untuk mengukur kecepatan putaran turbin angin. Nilai setpoint ditentukan dari 0 RPM sampai dengan 120 RPM. Masukan kontroler Fuzzy berupa nilai error dan delta error digunakan oleh kontroler dalam memutuskan besaran sudut pitch bilah turbin angin. Perubahan sudut pitch bilah ini dilakukan dengan menggunakan servomotor. Kecepatan angin yang berubah-ubah pada sistem tersebut dapat dianggap sebagai energi untuk menggerakkan turbin maupun sebagai gangguan terhadap sistem loop tertutup.

Metode kontrol logika Fuzzy yang dibangun menggunakan metode Mamdani yang melibatkan defuzzifikasi The Middle of Maximum method (MOM)[8]. Metode ini dibangun dengan menggunakan persamaan garis berbentuk segitiga yang ada pada software Simulink/Matlab. Penggunaan simulasi Simulink/Matlab ini dilakukan untuk mempermudah dan penyederhanaan program yang dibuat dengan bahasa C. Masukan kontrol Fuzzy adalah error dan delta error sedangkan keluarannya berupa data sinyal PWM (Pulse Wide Modulation) untuk servomotor dalam merubah posisi sudut pitch bilah. Fungsi keanggotaan error diperoleh dengan cara mengurangi selisih antara keluaran kecepatan turbin (dalam RPM) dengan nilai setpoint, sedangkan delta error didapatkan dengan cara pengurangan nilai error awal dan nilai error akhir [4].

Tabel 2 berkaitan dengan basis aturan logika Fuzzy. Pemberian label notasi dan penamaan fungsi keanggotaan menggunakan nama notasi yang sama untuk setiap keanggotaan agar memudahkan dalam memberikan nilai keanggotaan. Sebagaimana dituliskan pada Tabel 3, untuk masing-masing fungsi keanggotaan untuk error, delta error, dan sudut pitch terdiri atas: NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB. Perancangan sistem kontrol Fuzzy dilakukan dengan menentukan fungsi untuk error dan delta error, serta sudut pitch bilah.

Turbin angin diputar dengan menggunakan blower yang diasumsikan sebagai angin, sedangkan rancangan sistem kontroler berbasis Logika Fuzzy diimplementasikan melalui mikrokontroler Arduino.

Gambar 6 menunjukkan grafik fungsi garis segitiga dan trapesium yang berkaitan dengan fungsi keanggotaan untuk error (kiri) dan delta error (kanan). Grafik fungsi ini didapatkan dari Matlab/ Simulink. Rentang nilai variabel error dari -15 sampai dengan 15. Angka minus disini menunjukkan bahwa adanya selisih dari nilai error dibandingkan dari setpoint nilai RPM. Sedangkan rentang nilai variabel delta error dari -3 sampai dengan 3. Delta error dihasilkan dari selisih nilai error sebelumnya dibandingkan dengan nilai error yang terbaru. Gambar 7 menunjukkan fungsi keanggotaan keluaran kontroler berupa sudut *pitch* bilah serta bentuk *surface Fuzzy* yang menggambarkan hubungan antara fungsi keanggotaan dari error dan delta error dengan fungsi keanggotaan keluaran kontroler.

C. Implementasi Kontroler Menggunakan Fuzzy

Desain program kontroler sistem turbin angin berbasis mikrokontroler arduino, mengacu pada diagram alir sebagaimana Gambar 8. Pada tersebut sistem dimulai saat sumber daya disuplai ke catu daya sistem kontrol sehingga instrumen pendukung yang terkait sistem kontrol mulai aktif. Selanjutnya dilakukan inisialisasi pada mikrokontroler untuk mengetahui port masukan dan port keluaran. Inisialisasi ini berfungsi memberikan nilai input dan output sekaligus pemberian alamat port untuk sensor masukan dan port keluaran, yang mana input sensor diberi nama *hall effect*, dengan menggunakan magnet permanen sebagai pemuncunya. Output berupa sinyal *Pulse Wide Modulation (PWM)* yang di umpankan langsung ke kaki data motor *servo*. Motor *servo* ini berfungsi sebagai aktuator sudut *pitch blade* VAWT. Nilai sudut *pitch* awal ditentukan pada bagian blok ini. Langkah selanjutnya adalah menentukan batas nilai RPM yaitu nilai RPM saat untuk memulai transfer output kontrol *Fuzzy* ke motor *servo*.

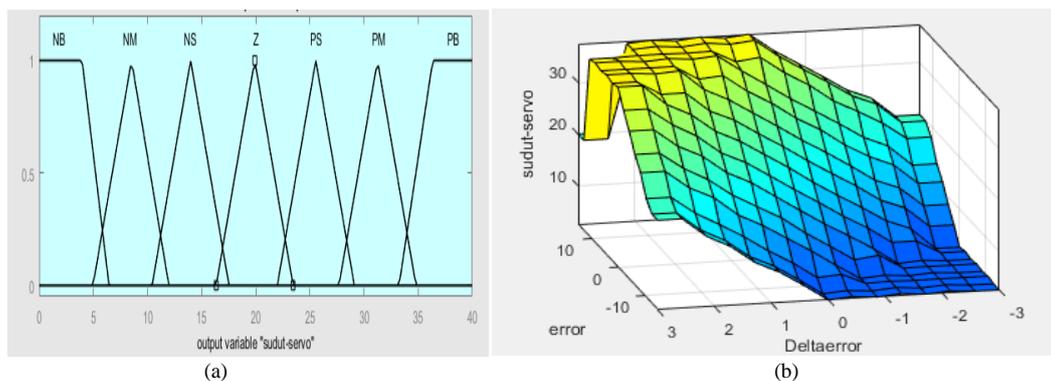
Nilai masukan dari sensor RPM yang masih berupa pulsa perlu dilakukan penjumlahan dalam setiap detiknya atau yang biasa disebut *Pulse Per Second (PPS)*. Kemudian agar bisa dirubah ke dalam satuan RPM perlu dilakukan konversi PPS ke RPM dengan menggunakan persamaan (4). Batas nilai RPM jika lebih besar dari nilai RPM baru, maka akan dilanjutkan ke proses kembali ke sudut optimal VAWT. Pada penelitian ini sudut *pitch* optimal yang digunakan adalah 0°. Motor *servo* yang berfungsi sebagai aktuator tidak bekerja saat nilai RPM terakhir bernilai di bawah nilai batas RPM, maka kemudian dilanjutkan dengan inisialisasi nilai setpoint yaitu memberikan nilai target setpoint RPM atau dengan kata lain nilai RPM dari VAWT yang diharapkan untuk dicapai.

D. Evaluasi Kinerja Sistem

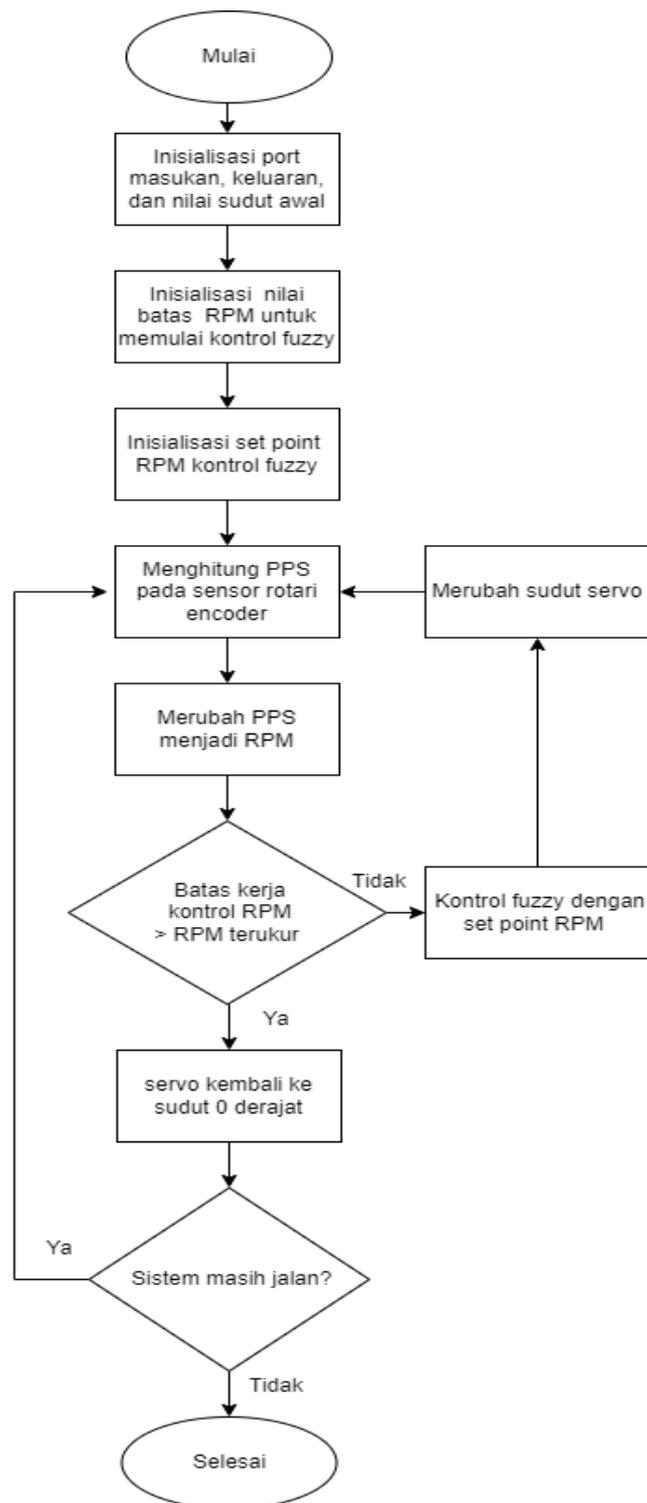
Kinerja (*performance*) dari sistem kontrol dapat di analisa dengan perhitungan menggunakan IAE (*integral of the absolute of value error*) yang dapat dirumuskan dalam Persamaan 8 [18][19].

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt \tag{8}$$

dimana *e* adalah error yang diperoleh dari pengurangan nilai setpoint terhadap nilai keluaran yang terukur. Pengukuran ini menjumlahkan (mengintegrasikan) kesalahan mutlak dari detik pertama sampai waktu tertentu. Berdasarkan Persamaan 8, apabila suatu sistem memiliki respon dimana nilai IAE semakin lama semakin besar, maka ini menunjukkan bahwa nilai setpoint dari sistem tersebut tidak pernah bisa dicapai atau tidak pernah mendekati nilai setpoint. Sebaliknya apabila nilai IAE cenderung menuju ke suatu nilai tertentu, maka ini menunjukkan bahwa kinerja sistem kontrollernya relatif bagus karena variabel yang dikontrol dapat mengikuti nilai setpoint yang diberikan.



Gambar 7. Fungsi keanggotaan untuk keluaran berupa sudut *pitch* bilah (kiri) dan hubungan antara fungsi keanggotaan (kanan)

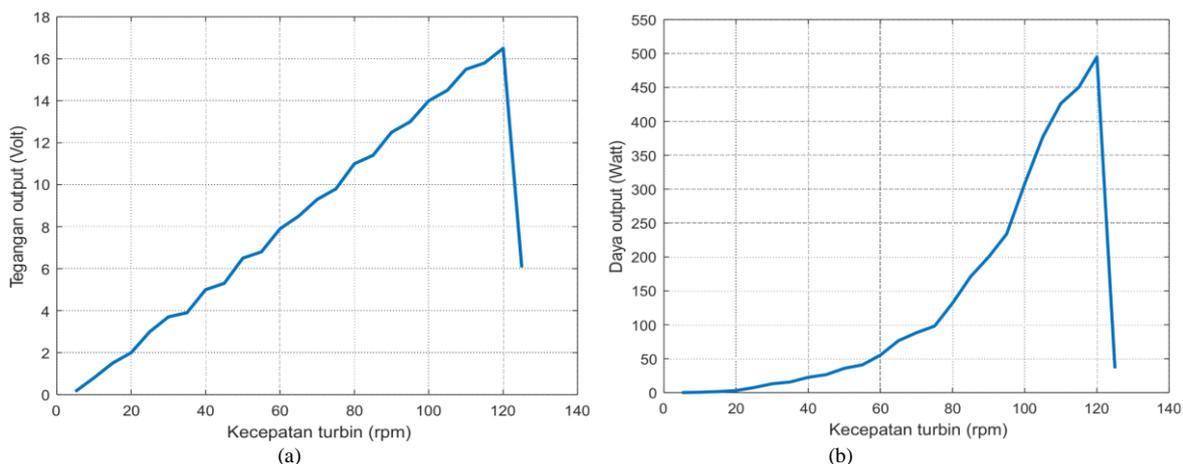


Gambar 8. Flowchart program berbasis Arduino mikrokontroler.

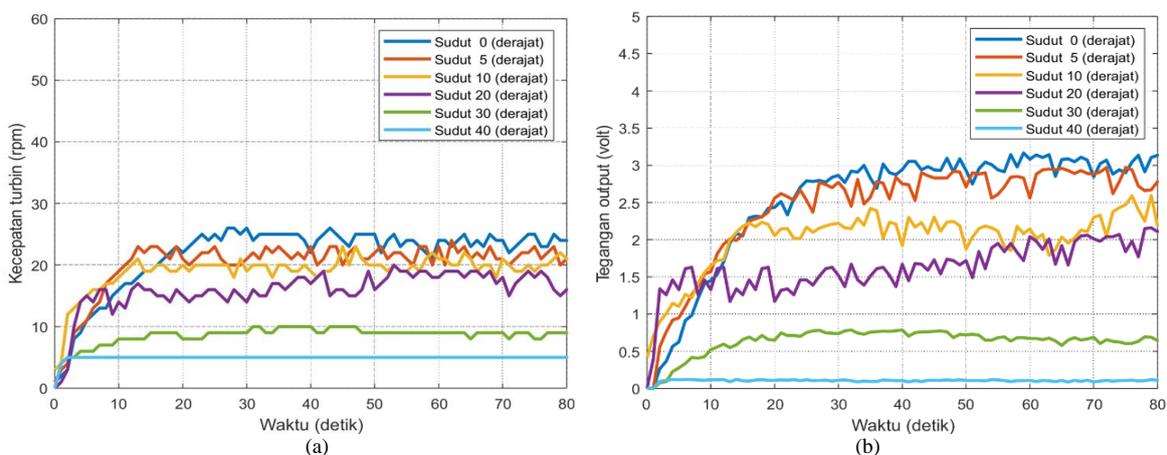
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Karakteristik PMSG

Gambar 9 ditunjukkan hubungan tegangan keluaran PMSG yang berbanding lurus dengan kecepatan putaran PMSG. Sebaliknya untuk keluaran daya yang dihasilkan terdapat bentuk kurva yang tidak linear. Hal ini disebabkan karena arus yang dihasilkan tidak linear dengan kecepatan putaran PMSG. Selanjutnya pada kecepatan 120 RPM diperoleh besaran tegangan maupun daya keluaran yang dihasilkan mengalami penurunan tajam.



Gambar 9. Hasil pengukuran tegangan turbin (kiri) dan daya turbin (kanan) terhadap kecepatan turbin



Gambar 10. Pengukuran kecepatan turbin (a) dan tegangan output (b) untuk kecepatan angin 2 m/s dengan berbagai sudut bilah.

Berdasarkan dari hasil pengujian yang diberikan pada Gambar 2 diperoleh hasil karakteristik PMSG dimana kecepatan putaran PMSG dan keluaran tegangan dan keluaran dayanya diperoleh sebagaimana di berikan pada Gambar 9. Dari gambar grafik diperoleh bahwa pada saat turbin diputar dalam kecepatan rendah sampai tinggi (dalam satuan RPM) maka tegangan keluarannya juga akan ikut naik secara proporsional. Namun pada kecepatan sudut putaran 120 RPM diperoleh bahwa keluaran tegangannya turun menuju nol. Sebaliknya, untuk keluaran daya yang dihasilkan dari putaran ini, bentuk kurvanya tidak bergerak secara proporsional atau linear tetapi tampak terlihat seperti eksponensial. Hal ini menunjukkan bahwa arus yang dihasilkan tidak proporsional. Kemudian pada kecepatan sudut 120 RPM, keluaran daya ini mengalami penurunan secara tajam. Berdasarkan hasil ini maka penggunaan umpan balik berupa keluaran daya secara langsung pada [3],[4],[8] dapat mengabaikan dinamika sistem mekanis turbin tersebut karena keluaran daya yang dihasilkan sebenarnya tidak linear dengan kecepatan (putar) turbin.

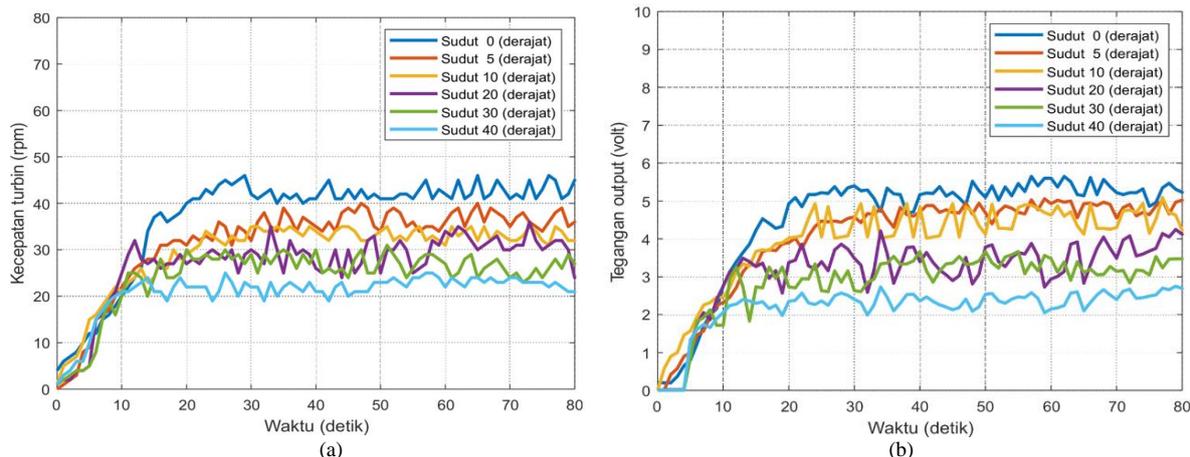
B. Hasil Pengujian Karakteristik Turbin Angin VAWT

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik dari prototipe turbin angin yang dibuat sebagaimana diberikan pada Gambar 3 diperoleh hasil pengukuran kecepatan turbin sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10, 11, dan 12. Pada gambar tersebut diperoleh bahwa apabila sudut *pitch* bilah adalah 0° maka kecepatan turbin akan mencapai nilai maksimumnya dimana kecepatan ini sesuai dengan kecepatan turbin. Pada kecepatan angin 2 m/s, 3.5 m/s, dan 5 m/s diperoleh bahwa masing-masing kecepatan turbin maksimal adalah sekitar 25 RPM, 40 RPM, dan 75 RPM. Namun untuk kecepatan angin yang sama, peningkatan sudut *pitch* bilah akan membuat kecepatan turbin angin menjadi turun. Dari ketiga skenario ini diperoleh bahwa penurunan sudut *pitch* bilah akan menaikkan kecepatan sudut sehingga hubungannya adalah hubungan terbalik. Berikutnya, untuk keluaran tegangan yang dihasilkan, diperoleh hubungan

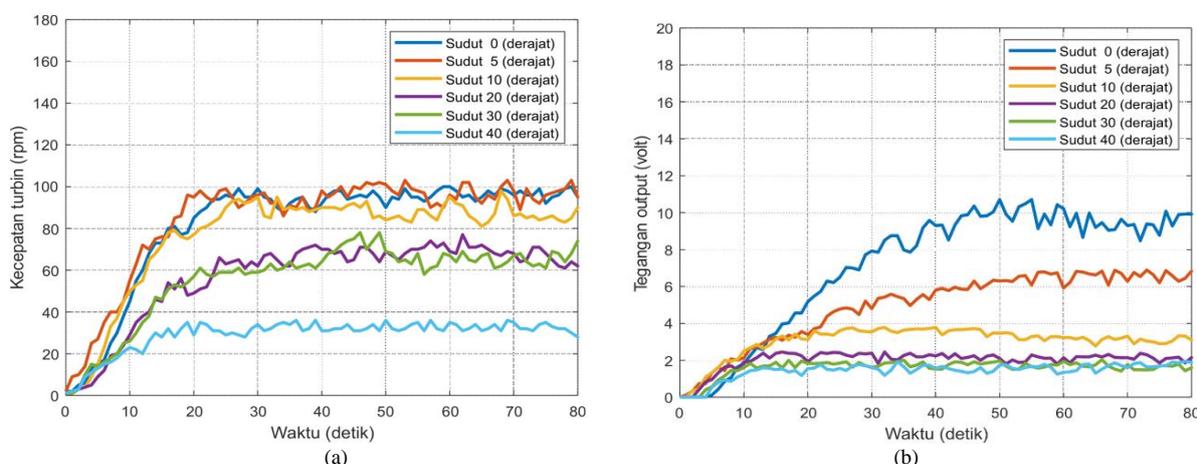
bahwa peningkatan kecepatan turbin angin akan ikut meningkatkan keluaran tegangan sehingga hubungannya adalah proporsional. Pada Gambar 10,11, dan 12 apabila kecepatan angin 5 m/s maka diperoleh keluaran tegangan maksimal sekitar 10 V, sedangkan untuk kecepatan angin 2 m/s dan 3.5 m/s akan diperoleh masing-masing sekitar 3 V dan 5 V.

C. Hasil Pengujian Simulasi Simulink/Matlab

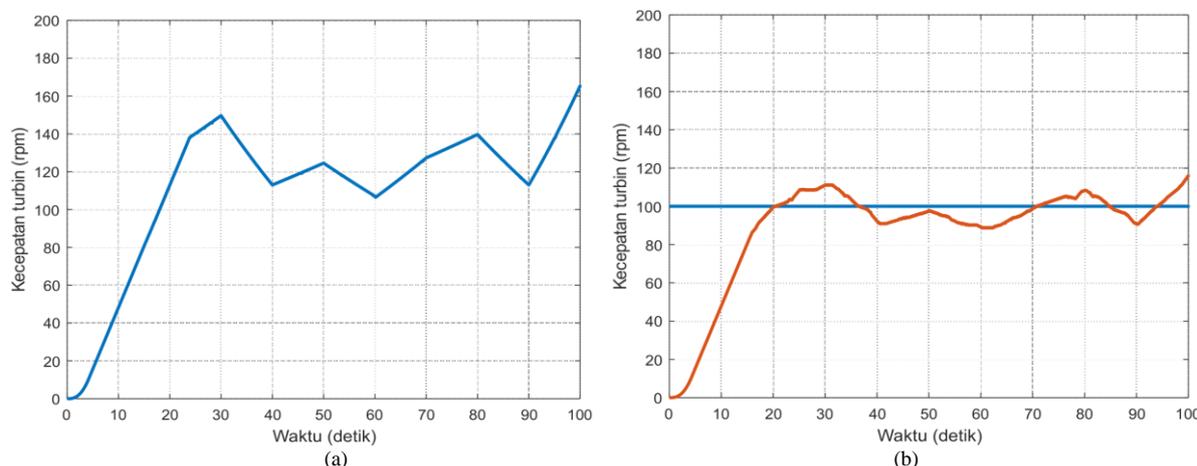
Untuk mengetahui efektivitas rancangan kontroler yang telah dibuat menggunakan kontrol *Fuzzy* dalam mengendalikan kecepatan turbin angin, maka pada bagian ini diberikan hasil simulasi terhadap turbin angin dengan menggunakan program Simulink/Matlab. Dalam simulasi ini digunakan model turbin angin dan PMSG, model tersebut telah tersedia pada program Simulink/Matlab. Selanjutnya, kontroler *Fuzzy* digunakan dalam blok kontroler, dan dapat dilihat bagaimana respon output kecepatan



Gambar 11. Pengukuran kecepatan turbin (a) dan tegangan output (b) untuk kecepatan angin 3.5 m/s dengan berbagai sudut bilah.



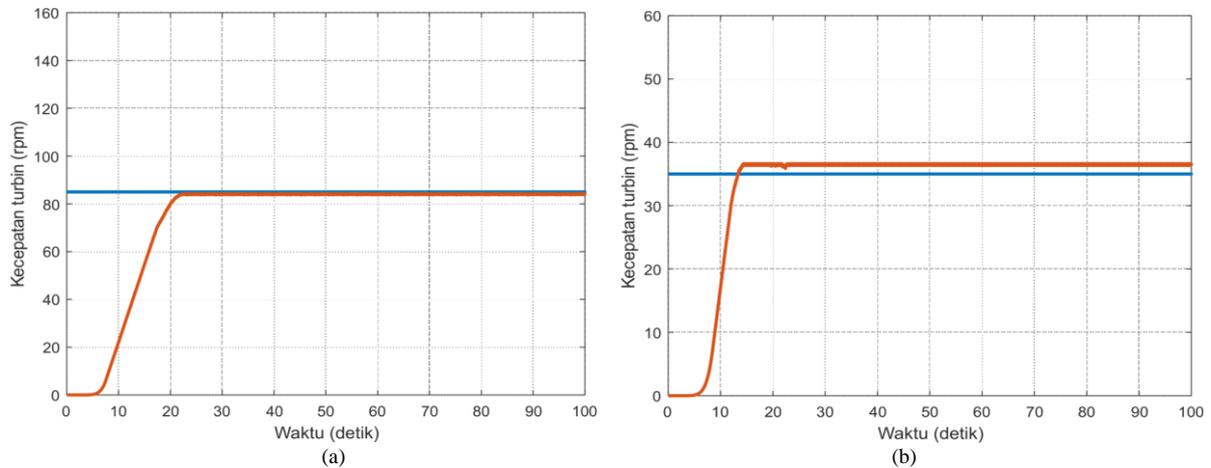
Gambar 12. Pengukuran kecepatan turbin (a) dan tegangan output (b) untuk kecepatan angin 5 m/s dengan berbagai sudut bilah.



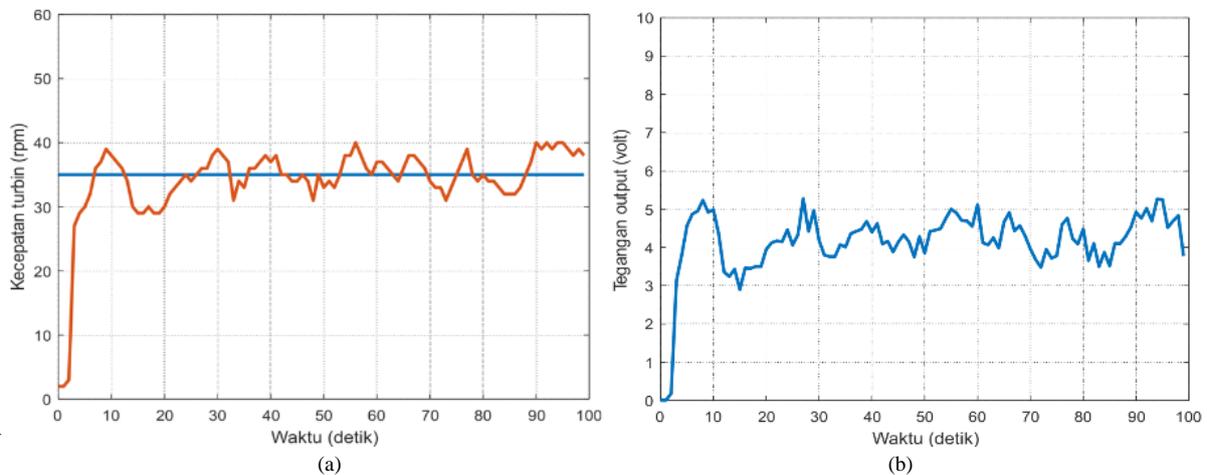
Gambar 13. Simulasi respon kecepatan turbin tanpa kontroler dengan kecepatan angin rata-rata 6.8 m/s (a), dan respon kecepatan turbin yang terkontrol dengan setpoint 100 RPM dan kecepatan angin rata-rata 6.8 m/s (b).

turbin terhadap setpoint kecepatan turbin yang diinginkan. Hasil simulasi ini dapat diberikan pada Gambar 13 dan Gambar 14.

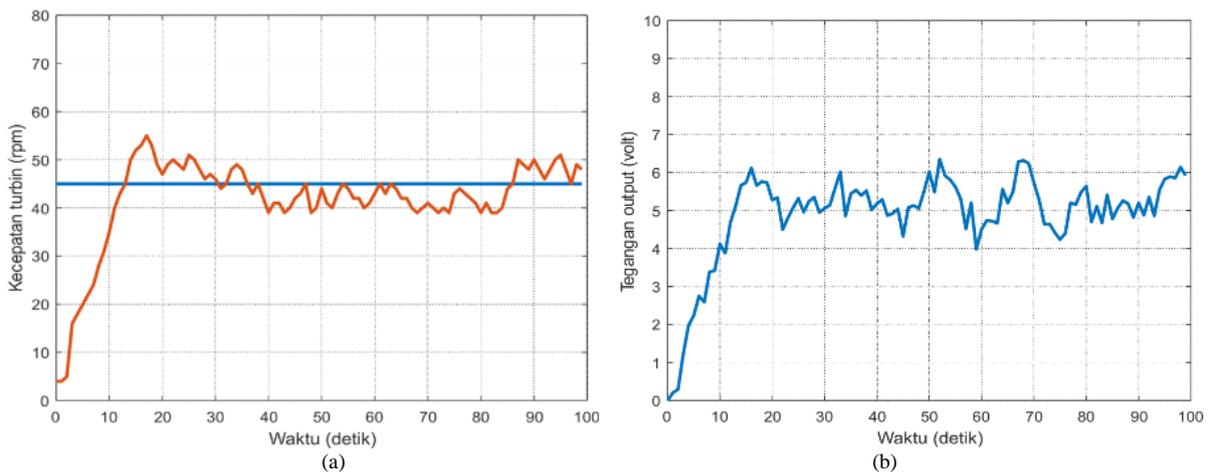
Dalam simulasi dilakukan beberapa perlakuan yaitu simulasi dengan dan tanpa menggunakan kontrol *Fuzzy* serta simulasi dengan dan tanpa *signal builder*. Simulasi ini terbagi menjadi beberapa tahapan, pada tahap pertama, simulasi dilakukan tanpa menggunakan kontroler. Simulasi ini dilakukan menggunakan input *signal builder* pada Simulink/Matlab dengan kecepatan angin rata-rata berkisar pada 6.8 m/s. Gangguan berupa *noise* diinjeksikan agar bentuk sinyal yang diproses menyerupai angin



Gambar 14. Simulasi respon kecepatan turbin terkontrol dengan setpoint 85 RPM dengan kecepatan angin 6.8 m/s (a), dan respon kecepatan turbin yang terkontrol dengan setpoint 35 RPM dan kecepatan angin rata-rata 5.5 m/s (b)



Gambar 15. Kecepatan turbin dengan setpoint 35 RPM (a) dan tegangan output (b) untuk kecepatan angin 5.5 m/s



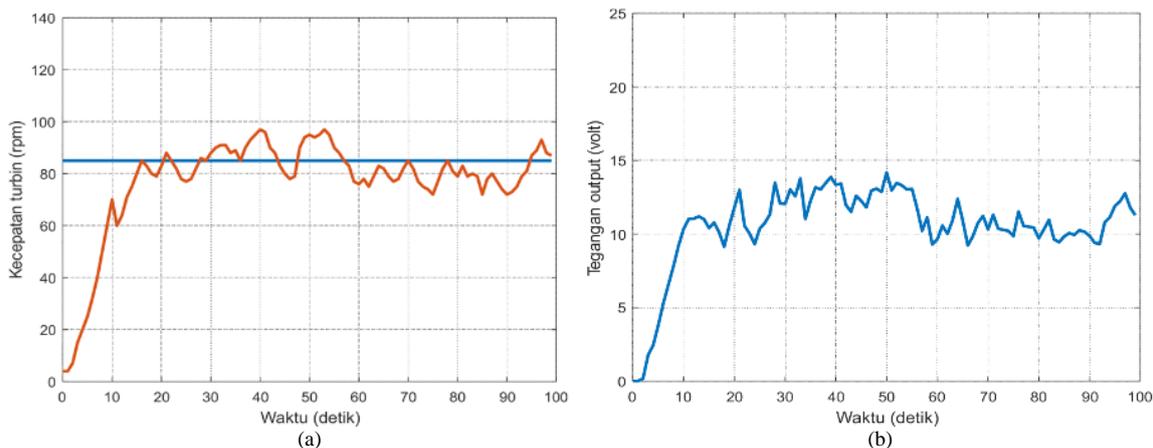
Gambar 16. Kecepatan turbin dengan setpoint 45 RPM (a) dan tegangan output (b) dengan kecepatan angin 5.5 m/s

yang sebenarnya. Hasil output simulasi respon kecepatan turbin angin dapat dilihat pada Gambar 13 (kiri). Pada tahap kedua, dilakukan simulasi dengan mengimplementasikan controller ke dalam sistem dimana kecepatan angin berada pada kisaran rata-rata 6.8 m/s. Pada Gambar 13 (kanan) ditunjukkan hasil output simulasi respon kecepatan turbin angin.

Pada tahapan ketiga, simulasi dilakukan tanpa menggunakan *signal builder*. Setpoint yang digunakan berada pada kecepatan 85 RPM dengan rata-rata kecepatan angin 6.8 m/s. Pada tahapan ini digunakan controller *Fuzzy* dimana hasilnya dapat diperlihatkan pada Gambar 14 (kiri). Untuk simulasi pada

Tabel 4
 Performa Respon Sistem Kontrol

Setpoint (RPM)	IAE	
	Simulasi	Eksperimen
35	480.31	315
45	602.5	544
85	1205.0	1126.5
100	1506.3	1455.7



Gambar 17. Kecepatan turbin dengan setpoint 85 RPM (a) dan tegangan output (b) untuk kecepatan angin 6.7 m/s

tahapan keempat dilakukan tanpa menggunakan signal builder dimana hasil respon kecepatan turbin anginnya ditunjukkan pada Gambar 14 (kanan). Kecepatan angin rata-rata yang digunakan adalah 5.5 m/s dengan setpoint 35 RPM. Berdasarkan dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa rancangan kontroler untuk mengendalikan kecepatan turbin dapat dilakukan secara efektif, meskipun pada Gambar 13 (kanan) untuk setpoint 100 RPM tampak respon sistem tidak begitu mulus (*smooth*) dan berosilasi. Hal ini dikarenakan pada sinyal masukan diberikan berupa gangguan *noise*. Hal ini berbeda dengan hasil simulasi lainnya dimana kecepatan turbin cenderung mengikuti nilai setpoint walaupun terdapat galat (*error*) dengan nilai tertentu.

D. Hasil Eksperimen pada VAWT

Eksperimen dilakukan untuk menguji efektivitas sistem kontrol yang diusulkan dalam mengendalikan turbin angin. Dalam eksperimen digunakan skenario kecepatan angin yang berbeda yaitu 5.5 m/s dan 6.7 m/s. Demikian pula untuk nilai setpoint kecepatan turbin yang dipilih, yaitu 35 RPM, 45 RPM, dan 85 RPM. Selain kecepatan turbin, pengukuran terhadap tegangan juga dilakukan untuk melihat respon dari keluaran tegangan yang dihasilkan walaupun berdasarkan pada bagian pengujian karakteristik PMSG telah diketahui bagaimana hubungan antara kecepatan turbin dan keluaran tegangan secara empiris.

Hasil eksperimen yang telah dilakukan dapat diberikan pada Gambar 15, 16, dan 17. Pengukuran terhadap kecepatan turbin dan keluaran tegangan ini dilakukan melalui datalogger, sedangkan penentuan kecepatan angin yang digunakan secara eksperimen ini diperoleh melalui alat anemometer. Dengan menggeser-geser posisi *blower* relatif terhadap turbin angin sehingga dapat ditentukan kecepatan angin yang diinginkan. Pada gambar tersebut terlihat bahwa sinyal hasil pengukuran yang diperoleh dalam eksperimen cenderung memiliki bentuk sinyal yang mirip namun berbeda dalam skalanya.

Berdasarkan dari hasil eksperimen yang telah dilakukan diketahui bahwa kontroler yang diusulkan mampu mengendalikan turbin angin sesuai dengan nilai setpoint yang diberikan. Meski demikian terdapat fluktuasi dari respon kecepatan turbin angin. Hal ini kemungkinan disebabkan karena sensor untuk mengukur kecepatan putaran turbin angin yang kurang akurat sehingga ikut berdampak dalam loop kontroler dimana error dan delta error digunakan sebagai masukan (Gambar 5). Berdasarkan Gambar 15, 16, dan 17, semakin tinggi nilai setpoint diberikan pada sistem maka tegangan keluaran yang dihasilkan juga akan ikut naik secara proporsional. Pada setpoint 35 RPM diperoleh tegangan keluaran sekitar 4 V, sedangkan untuk setpoint 45 RPM dan 85 RPM dihasilkan keluaran tegangan masing-masing sekitar 5 V dan 11 V. Hasil tren ini konsisten dengan hasil pengujian karakteristik *Variable Speed*

VAWT yang diputar melalui *blower* pada Gambar 10, 11, dan 12 dimana kenaikan tegangan keluaran mengikuti kecepatan putaran turbin angin. Nilai masing-masing IAE untuk setiap setpoint dapat diberikan pada Tabel 4.

Pada Tabel 4 terlihat kecenderungan nilai error yang semakin besar yang berbanding lurus dengan kenaikan nilai setpoint. Nilai IAE untuk hasil simulasi diperoleh lebih tinggi dibandingkan dengan hasil eksperimen. Meski hasil keduanya tidak sama, namun terdapat konsistensi antara simulasi dan eksperimen untuk setiap kenaikan setpoint. Prosentase perbedaan untuk masing-masing IAE pada untuk setiap setpoint di Tabel 4 adalah 52.48%, 10.75%, 6.97%, dan 3.48%, atau secara rata-rata nilai IAE untuk hasil simulasi lebih tinggi 10.25% dibandingkan dengan hasil eksperimen. Semakin kecil nilai setpoint yang digunakan maka akan semakin besar perbedaan antara nilai simulasi dan eksperimen. Ini menunjukkan bahwa pengontrolan kecepatan turbin angin dengan nilai setpoint lebih kecil akan lebih sulit dibandingkan dengan nilai setpoint lebih tinggi.

Dari hasil simulasi dan eksperimen ditunjukkan bahwa pengontrolan kecepatan turbin dapat dilakukan dengan mengendalikan sudut *pitch* bilah agar kecepatan turbinnya mengikuti nilai setpointnya meskipun hasil pengukuran kecepatan turbin ini secara eksperimen selalu berfluktuasi. Hal ini bisa disebabkan oleh karena kualitas sensor yang digunakan kurang presisi. Karena hasil pengukuran kecepatan ini kurang akurat akibatnya umpan balik yang digunakan sebagai masukan pada kontrollernya pun juga ikut berpengaruh sehingga hasilnya tampak terlihat sebagaimana Tabel 4. Namun demikian, pengontrolan kecepatan turbin ini dapat dilakukan dan bisa digunakan untuk memperbaiki struktur controller yang digunakan pada [3],[4],[8] yaitu dengan menjadikannya sebagai bagian dari variabel yang dikontrol dalam pengontrolan keluaran dayanya. Hal ini dapat dilakukan misalnya dengan penerapan dual-loop controller. Penggunaan variabel kecepatan turbin sebagai bagian dari sistem yang dikontrol adalah untuk memperbaiki perilaku dinamika sistem mekanisnya agar lebih baik.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian karakteristik PMSG menggunakan *testbed* diperoleh hubungan antara kecepatan putaran rotor PMSG dengan tegangan dan daya keluarannya. Namun pada batas kecepatan tertentu diperoleh bahwa tegangan outputnya akan turun pada saat kecepatan putar menyentuh 120 RPM. Penurunan tegangan pada PMSG saat RPM melebihi angka 120 RPM terjadi karena adanya sistem proteksi yang terdapat di dalam PMSG yang berfungsi untuk melindungi terjadinya kerusakan sebagai akibat kondisi *over speed*. *Over speed* pada PMSG ini dapat menyebabkan kelebihan tegangan dan daya yang dihasilkan oleh kumparan stator. Hasil yang diperoleh dalam pengujian *testbed* tersebut juga konsisten dengan pengujian kecepatan turbin menggunakan *blower*/kipas angin yang diasumsikan sebagai hembusan angin. Perancangan controller menggunakan Logika *Fuzzy* menggunakan data-data yang telah diperoleh telah direalisasikan dan diujikan dalam lingkungan laboratorium. Dari hasil pengujian dengan masing-masing nilai setpoint kecepatan turbin 35, 45, 85, dan 100 RPM melalui simulasi dan eksperimen diperoleh bahwa pengontrolan kecepatan turbin untuk nilai setpoint kecepatan turbin lebih tinggi akan lebih baik hasilnya dibandingkan jika menggunakan nilai setpoint kecepatan turbin rendah. Rata-rata perbedaan hasil antara simulasi dan eksperimen sekitar 10.25%. Dari hasil simulasi dan eksperimen ini dapat disimpulkan bahwa efektivitas rancangan kontrol *Fuzzy* yang telah dibuat mampu mengendalikan kecepatan turbin VAWT.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. L. Negara, "Gandeng AFD Prancis, PLN Bakal Bangun Pembangkit Tenaga Angin 200 MW di Banten." PLN Website, 16 Maret 2022." *PLN Website*, 2022. .
- [2] J. Fadil, S. Soedibyo, and M. Ashari, "Performance Analysis of Vertical Axis Wind Turbine with Variable Swept Area," in *International Seminar on Intelligent Technology and Its Application*, 2017, pp. 217–221.
- [3] J. Fadil, S. Soedibyo, and M. Ashari, "Novel of Vertical Axis Wind Turbine with Variable Swept Area Using Fuzzy Logic Controller," *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 256–267, 2020.
- [4] J. Fadil, S. Soedibyo, and M. Ashari, "Smart Variable Rotor of Vertical Axis Wind Turbine with Faster Cut-in Speed and Wide Range Extract Power using Artificial Intelligent," *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 13, no. 6, pp. 500–511, 2020.
- [5] C. M. Chan, H. L. Bai, and D. Q. He, "Blade shape optimization of the Savonius wind turbine using a genetic algorithm," *Appl. Energy*, vol. 213, pp. 148–157, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.01.029.
- [6] T. Purbaya, A. Jannifar, and S. Bahri, "Rancang Bangun Blade Kincir Angin Vertikal Axis Wind Turbin," *J. Mesin Sains Terap.*, vol. 5, no. 2, pp. 65–70, 2021.
- [7] D. N. Ramadhani, "Desain Dan Simulasi Turbin Angin Sumbu Vertikal Dengan Sudu Rotor Naca 0021," *Procedia Eng. Life Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2021.
- [8] A. Iqbal, D. Ying, A. Saleem, M. A. Hayat, and K. Mehmood, "Efficacious Pitch Angle Control of Variable-Speed Wind Turbine Using Fuzzy based Predictive Controller," *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 423–427, 2020.

- [9] A. B. Asghar and X. Liu, "Estimation of Wind Turbine Power Coefficient by Adaptive Neuro-fuzzy Methodology," *Neurocomputing*, vol. 238, pp. 227–233, 2017.
- [10] S. A. Hamoodi, F. I. Hameed, and A. N. Hamoodi, "Pitch Angle Control of Wind Turbine Using Adaptive Fuzzy-PID Controller," *EAI Endorsed Trans. Energy Web*, vol. 7, no. 28, pp. 1–8, 2020.
- [11] N. C. Sahoo, A. S. Satpathy, N. K. Kishore, and B. Venkatesh, "D.C. Motor-Based Wind Turbine Emulator Using LabVIEW for Wind Energy Conversion System Laboratory Setup," *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, vol. 50, no. 2, pp. 111–126, Apr. 2013, doi: 10.7227/IJEEE.50.2.1.
- [12] A. Dida and D. Ben Attous, "Doubly-fed induction generator drive based WECS using fuzzy logic controller," *Front. Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 272–281, Sep. 2015, doi: 10.1007/s11708-015-0363-9.
- [13] A. Dida, F. Merahi, and S. Mekhilef, "New Grid Synchronization and Power Control Scheme of Doubly-Fed Induction Generator based Wind Turbine System Using Fuzzy Logic Control," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 84, pp. 1–18, 2020.
- [14] M. Zerouali, M. Boutouba, A. El Ougli, and B. Tidhaf, "Control of Variable Speed Wind Energy Conversion Systems by Fuzzy Logic and Conventional P&O," in *International Conference on Intelligent Systems and Advanced Computing Sciences (ISACS)*, 2019, pp. 1–5.
- [15] O. Apata and D. T. O. Oyedokun, "An overview of control techniques for wind turbine systems," *Sci. African*, vol. 10, p. e00566, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00566.
- [16] J. Zhang, M. Cheng, Z. Chen, and X. Fu, "Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines," in *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2009, pp. 2691–2696.
- [17] H. W. C. Akbar, N. C. Basjaruddin, and E. Sutjiredjeki, "Pengendalian Kendaraan menggunakan Sarung Tangan Elektronik berbasis Kendali Fuzzy Logic," *8th Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, pp. 408–413, 2017.
- [18] A. Khuriati R.S., "Identifikasi dan Perancangan Pengendali PID Menggunakan Penduga ARX Sistem Pemanas Udara (Halaman 1 s.d. 5)," *J. Fis. Indones.*, vol. 17, no. 51, pp. 1–5, 2014, doi: 10.22146/jfi.24424.
- [19] J. Pahasa and I. Ngamroo, "Coordinated Control of Wind Turbine Blade Pitch Angle and PHEVs Using MPCs for Load Frequency Control of Microgrid," *IEEE Syst. J.*, vol. 10, no. 1, pp. 97–105, 2016, doi: 10.1109/JSYST.2014.2313810.