

Kontrol Sudut Pitch Blade Sebagai Variable Kecepatan Angin Menggunakan Simulasi Matlab Dengan Kendali Logika Fuzzy Mamdani

Muhammad Zainal Roisul Amin^{**1}, Fina Farhana², Bambang Sri Kaloko³

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Banyuwangi, 68418, Indonesia

²Program Studi Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Nurul Jadid, 67291, Indonesia

³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember, 68121, Indonesia

¹mzainalra@unibabwi.ac.id, ²fina.farhana91@gmail.com, ³kaloko@unej.ac.id,

^{**}Corresponding Author: mzainalra@unibabwi.ac.id



Cite: <https://doi.org/10.63440/jef.v2i1.61>



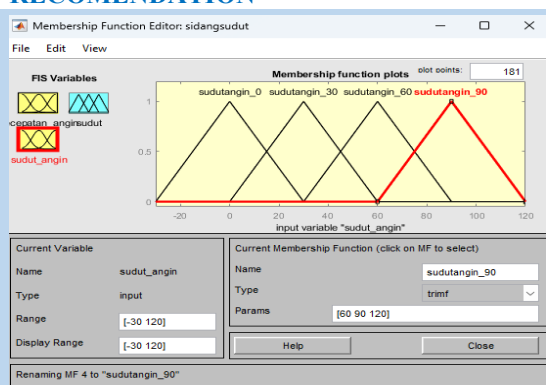
Read Online

ACCESS

Abstract: Wind energy as an alternative energy to meet the increase in energy. However, in places with limited wind quality, it is necessary to install suitable wind turbines to generate optimal power. Installation of a vertical axis wind turbine Savonius can be carried out at unstable wind speeds. PID controllers work well when the wind is stable, but not when the wind speed changes drastically. Automatic adjustment of the angle value on a Savonius type vertical axis wind turbine is required to produce a constant output power of 20kW using a fuzzy logic controller (FLC).

The membership of FLC is determined from the methodology of measuring wind speed at the calculated distance and statistical analysis of wind variability. In this way, it is possible to anticipate the response of the actuator to the gust of wind to the rotor. The test results showed that the smaller the wind speed that enters the turbine, the greater the angle of the blades. Conversely, the greater the wind speed that enters the turbine, the smaller the angle of the blades. The control results show that the resulting pitch angle parameter has a value ranging from 0 to 18.428 degrees, with a wind speed value interval of 0 to 5 m/s. The input wind speed value of 5 m/s by controlling the angle of 18.428 degrees aims to maintain the generated power value of 20,000 watts. The purpose of this research is to increase the output power and reduce the risk of rotor damage due to vibrations.

RECOMENDATION



Keyword: Wind Turbine, Pitch Control, Fuzzy Logic Controller, Matlab

Article Info

Recieved
May 05, 2025

Revised
May 20, 2025

Accepted
June 02, 2025

Published
July 12, 2025



1. PENDAHULUAN

Kapasitas pembangkitan listrik yang besar diperlukan untuk memenuhi permintaan yang terus meningkat, yang menggarisbawahi pentingnya memperoleh daya dari sumber daya alam yang berkelanjutan untuk menjaga lingkungan. Dalam bidang energi bersih, tenaga angin telah memperoleh daya tarik akhir-akhir ini. Khususnya, Dewan Energi Angin Global mengungkapkan pemasangan fasilitas energi angin baru sebesar 60,4 GW pada tahun 2019, yang berkontribusi pada kapasitas global sebesar 651 GW [1]. Prakiraan menunjukkan pertumbuhan tahunan yang diantisipasi melebihi 100 GW dalam pemasangan selama dekade mendatang. Meskipun demikian, kemajuan dan penggunaan turbin angin yang semakin besar merupakan tren teknologi yang berlaku [2].

Saat ini, Siemens Gamesa membanggakan produksi turbin angin dengan peringkat tertinggi, dengan daya nominal 14 MW, dengan diameter area seluas 222 m dan memerlukan kecepatan angin tahunan rata-rata 10 m/s. Kemajuan turbin angin terhambat oleh pola angin yang tidak menentu dan kecepatan angin yang berfluktuasi, sehingga menimbulkan risiko inefisiensi operasional dan potensi malfungsi. Untuk tujuan ini, turbin angin harus mengakomodasi kecepatan angin yang bervariasi dan mengurangi dampak gaya angin pada rotor dengan memodulasi sudut antara bilah dan aliran angin [3][4].

Permasalahan sudut pitch pada blade turbin angin dapat terjadi jika tidak diatur dengan tepat. Sudut pitch yang salah dapat menyebabkan turbin tidak menghasilkan daya optimal atau bahkan mengalami kerusakan. Secara konvensional, kontrol sudut pitch dicapai melalui penerapan pengontrol Proportional Integral Derivative (PID), yang didasarkan pada model matematika sistem yang didukung oleh umpan balik dari variabel yang dikontrol. Pendekatan ini menghitung deviasi antara nilai terukur dan nilai yang diinginkan [5].

Kalibrasi pengontrol PID melibatkan penetapan nilai optimal untuk konstanta proporsional, waktu integral, dan waktu turunan (gain), yang disesuaikan dengan respons kontrol yang diinginkan. Namun demikian, dalam skenario turbin angin berkecepatan variabel, respons optimal bergantung pada besarnya fluktuasi kecepatan angin, yang membuat pengontrol PID rentan terhadap ketidakstabilan di tengah perubahan kecepatan angin yang tiba-tiba [6]. Langkah penting telah dibuat dalam metodologi kontrol pitch turbin angin untuk mengurangi fluktuasi kecepatan angin. Pemanfaatan pengontrol logika fuzzy (FLC) menghadirkan pendekatan baru dengan memilih perolehan PID yang telah dihitung sebelumnya berdasarkan kesalahan variabel proses atau penyimpangan yang parah. Logika fuzzy berperan penting dalam menyempurnakan sudut pitch bilah pada turbin angin untuk meningkatkan kinerja secara optimal [7][8][9].

Penelitian sebelumnya yang meneliti pengendali turbin angin telah dilakukan, termasuk penelitian yang dilakukan oleh Chavero-Navarrete, yang menyajikan analisis komparatif sistem yang menggunakan pengendali PID [10][11]. Hasil dari pengendali logika fuzzy menggarisbawahi respons optimal dalam mengelola sistem sudut kemiringan secara efektif di tengah gangguan dan ketidakpastian yang melekat pada sistem [12][13]. Jelas, integrasi logika fuzzy ke dalam pengontrol sudut pitch untuk turbin angin menunjukkan karakteristik pengontrol yang unggul ketika disandingkan dengan pengontrol Proportional Integral Derivative (PID) atau sistem yang tidak memiliki pengontrol [14].

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan pengontrol PID dapat menyebabkan penurunan stabilitas sistem dibandingkan dengan pengontrol fuzzy. Sebaliknya, sistem tanpa pengendali dapat melampaui kapasitas pembangkitan daya mekanis sebesar 20.000 Watt,

sehingga menghambat penentuan sudut kemiringan bilah pada kecepatan angin tertentu. Aspek perintis dari penelitian ini terletak pada kapasitas untuk membedakan kecepatan pemotongan dan kecepatan pemotongan sistem kendali. Pemodelan pengontrol sudut pitch bilah turbin angin melalui simulasi Matrix Laboratory (MATLAB) dan Simulink menjelaskan bahwa dengan pengontrol logika fuzzy, kontrol sudut pitch turbin angin yang stabil dapat dicapai, yang menangani kecepatan cut-out secara efektif [15][16].

Gap penelitian pada pitch blade adalah kontrol sudut yang tepat. Karena metode penelitian sebelumnya memiliki keterbatasan pengaturan sudut. Sehingga pemodelan sudut menerapkan metode *fuzzy logic*. Tujuan penelitian adalah pemodelan kontrol sudut blade menggunakan *fuzzy logic* dalam menjaga daya konstan. Kontribusi penelitian selanjutnya yaitu sistem kontrol sudut pitch turbin angin digunakan untuk menangani kecepatan cut-off secara efektif. Sehingga penelitian ini menjadi rekomendasi untuk desain kontrol cut-off otomatis yang dapat menyesuaikan kecepatan angin.

2. METODE

Pemodelan turbin angin sumbu vertikal dan pemodelan sudut pitch blade relatif terhadap kecepatan angin menggunakan Simulink Matlab. Pemodelan kendali sudut pitch blade menggunakan logika fuzzy diperlukan untuk mengendalikan kecepatan turbin angin sumbu vertikal. Terdapat subsistem yang digunakan dalam penelitian ini yaitu pemodelan turbin angin sumbu vertikal (VAWT) dan pemodelan kendali sudut pitch berbasis logika fuzzy. Kendali yang dirancang menggunakan Simulink Matlab digunakan untuk mengendalikan kecepatan turbin angin sumbu vertikal pada kecepatan angin dalam kisaran 1 m/s hingga 10 m/s.

A. Desain Pemodelan Sistem Turbin Angin

Persamaan matematika untuk daya mekanik turbin yang dihasilkan berdasarkan kecepatan angin ditunjukkan dalam persamaan 1.

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_r \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot (V_w)^3 \quad (1)$$

Keterangan:

P_m	= Daya Mekanik (W)
ρ	= Kerapatan Udara (kg/m ³)
A_r	= Luas Wilayah Bilah Turbin (m ²)
C_p	= Koefisien Daya
β	= Sudut Pitch Blade (derajat)
V_w	= Kecepatan Angin (m/s)
λ	= Rasio Kecepatan Tip

Fungsi dari rasio kecepatan ujung (λ) dan sudut pitch (β) adalah koefisien daya. Nilai daya mekanik turbin angin ditentukan melalui parameter yang telah ditentukan melalui koefisien daya. Rasio kecepatan ujung dapat dihitung berdasarkan persamaan (2) dan persamaan (3).

$$\lambda_T = \frac{R \cdot \omega_T}{V_m} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_T + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$

Keterangan:

λ_T	= λ optimal
ω	= Momen Inersia Turbin (rad/s)
R	= Jari-jari bilah (m)

Sudut kemiringan bilah turbin angin (β) menentukan nilai koefisien daya dan hubungan linier antara kecepatan angin dan kecepatan rotor turbin. Nilai efisiensi turbin angin ditentukan oleh nilai koefisien daya. Nilai koefisien daya dalam sistem dapat dinyatakan berdasarkan persamaan (4).

$$Cp(\lambda, \beta) = C_1(C_2 \frac{1}{\lambda} - C_3\beta - C_4\beta^2 - C_5)e^{(-C_6\frac{1}{\lambda})} \quad (4)$$

Keterangan:

C_1 = Nilai Koefisien 1

C_2 = Nilai Koefisien ke 2

C_3 = Nilai Koefisien ke 3

C_4 = Nilai Koefisien ke 4

C_5 = Nilai Koefisien ke 5

C_6 = Nilai Koefisien ke 6

Nilai radius (R) turbin angin sumbu vertikal dan nilai kecepatan sudut (ωt) turbin angin sumbu vertikal dapat diperoleh dengan memasukkan nilai parameter terstandar ke dalam persamaan matematika pada persamaan (1) sampai persamaan (4). Parameter lainnya seperti parameter kerapatan angin (ρ) akan diberikan nilai terstandar. Parameter kerapatan angin terstandar (ρ) adalah 1,225 kg/m³ dengan nilai parameter λT akan diberikan nilai 8,1. Kemudian, nilai parameter kecepatan turbin angin (V_w) dan daya mekanik turbin (P_m) ditetapkan masing-masing pada nilai 10 m/s dan 20.000 Watt. Nilai koefisien daya dari C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , dan C_6 berturut-turut adalah 0,5176; 116; 0,4; 0; 2,9038; -2. Akan tetapi, nilai koefisien daya juga memerlukan nilai λ . Nilai λ dihasilkan dengan menggunakan persamaan (4). Jika nilai λT dan nilai β telah ditentukan maka dapat diperoleh nilai λ . Setelah diperoleh nilai koefisien daya dengan menggunakan persamaan 1 sampai persamaan 4, selanjutnya dilanjutkan dengan menghitung nilai R dengan menggunakan persamaan (5) dengan rumus $Ar = \pi R^2$

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Ar \cdot Cp(\lambda, \beta) \cdot (V_w)^3 \\ P_m &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi R^2 \cdot Cp(\lambda, \beta) \cdot (V_w)^3 \\ R &= \sqrt{\frac{P_m}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot Cp(\lambda, \beta) \cdot (V_w)^3}} \end{aligned} \quad (5)$$

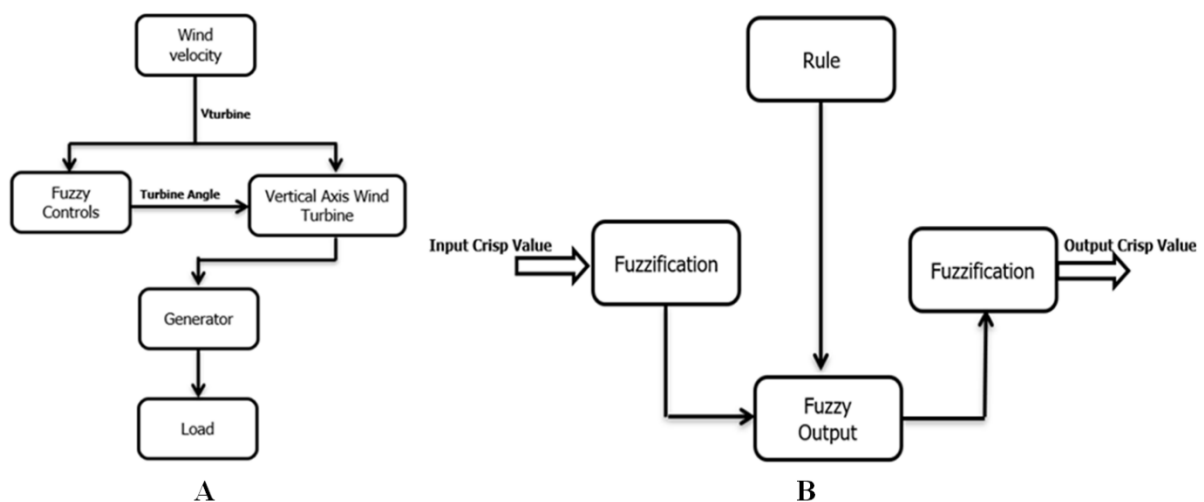
Persamaan (5) menyajikan nilai radius sudu pada turbin angin. Nilai parameter ini diperoleh dengan memasukkan nilai parameter terkait sesuai dengan persamaan (1) seperti massa jenis udara, koefisien daya, kecepatan angin dan daya mekanik. Nilai parameter radius sudu yang diperoleh akan digunakan untuk menentukan besarnya parameter momen inersia turbin berdasarkan persamaan (2). Dengan parameter V_w , λ , dan R akan diperoleh parameter momen inersia turbin. Parameter ωt dan parameter R akan digunakan sebagai acuan pembuatan model diagram blok pada Simulink MATLAB.

B. Diagram Blok Pengendali Sudut Pitch Menggunakan Fuzzy

Diagram blok pengendali sudut pitch dengan menggunakan pengendali logika fuzzy diperlukan untuk menguji sistem pengendali sudut pitch blade pada turbin angin. Dengan membuat diagram blok ini, pengujian sistem pengendali sudut pitch blade pada turbin angin dengan pengendali logika fuzzy dapat disimulasikan. Simulasi sistem ini dimaksudkan untuk mengatur sudut pitch dengan kecepatan angin dinamis menggunakan model matematika

turbin angin yang terhubung dengan Pengendali Logika Fuzzy (FLC). Seperti yang ditunjukkan pada gambar 1. Perubahan sudut pitch memberikan pengaruh yang besar terhadap jumlah koefisien daya, dan jumlah koefisien daya memberikan pengaruh yang besar terhadap daya mekanik yang dihasilkan.

Gambar 1a menyajikan diagram blok pengendali sudut pitch pada turbin angin dengan pengendali logika fuzzy. Kecepatan angin sebagai parameter input pada FLC digunakan untuk menentukan nilai parameter output pada FLC yaitu sudut pitch. Setelah nilai parameter sudut pitch diperoleh, nilai parameter ini dengan nilai parameter kecepatan angin akan menghasilkan parameter daya mekanik bagi generator. Parameter daya mekanik ini juga akan digunakan untuk memperoleh dua parameter lainnya, yaitu parameter daya generator dan parameter momen inersia mekanik generator. Parameter-parameter ini memerlukan aturan-aturan untuk menghasilkan nilai keluaran berdasarkan FLC. Oleh karena itu, aturan-aturan ini harus dibuat dalam pengontrol logika fuzzy.



Gambar 1a. Diagram Blok Pengontrol Sudut Pitch, **1b.** Diagram Blok Proses Fuzzifikasi

Dalam pembuatan aturan pengendali logika fuzzy, langkah pertama yang harus dilakukan adalah menentukan fungsi keanggotaan logika fuzzy untuk parameter masukan dan parameter keluaran. Langkah kedua adalah mengubah nilai crisp menjadi nilai fuzzy yang disebut dengan proses fuzzifikasi. Langkah selanjutnya adalah langkah ketiga yaitu memberikan aturan-aturan untuk penalaran logika fuzzy dan langkah terakhir mengubah nilai fuzzy menjadi nilai crisp yang disebut dengan proses defuzzifikasi. Diagram blok operasi pengendalian logika fuzzy ditunjukkan pada gambar 1b. Gambar 1b menunjukkan proses fuzzifikasi pada pengontrol logika fuzzy. Nilai crisp menjadi input dalam proses fuzzifikasi. Dengan mengikuti aturan yang telah dibuat, output logika fuzzy dapat diperoleh sehingga proses dezzuffifikasi dapat dilakukan. Proses dezzuffifikasi ini diperlukan untuk memulihkan output dari pengontrol logika fuzzy berdasarkan nilai crisp.

C. Pengujian Simulasi Sudut Pitch pada Turbin Angin

Pengujian simulasi sudut pitch plant pada turbin angin dilakukan dengan cara memasukkan nilai parameter kecepatan angin dengan rentang nilai tertentu sebagai parameter input. Setelah memasukkan parameter tersebut, dilakukan proses simulasi yang menghasilkan parameter keluaran daya optimum yang dihasilkan oleh turbin angin. Selain itu, proses simulasi yang dilakukan akan menghasilkan parameter koefisien daya. Pengujian dilakukan

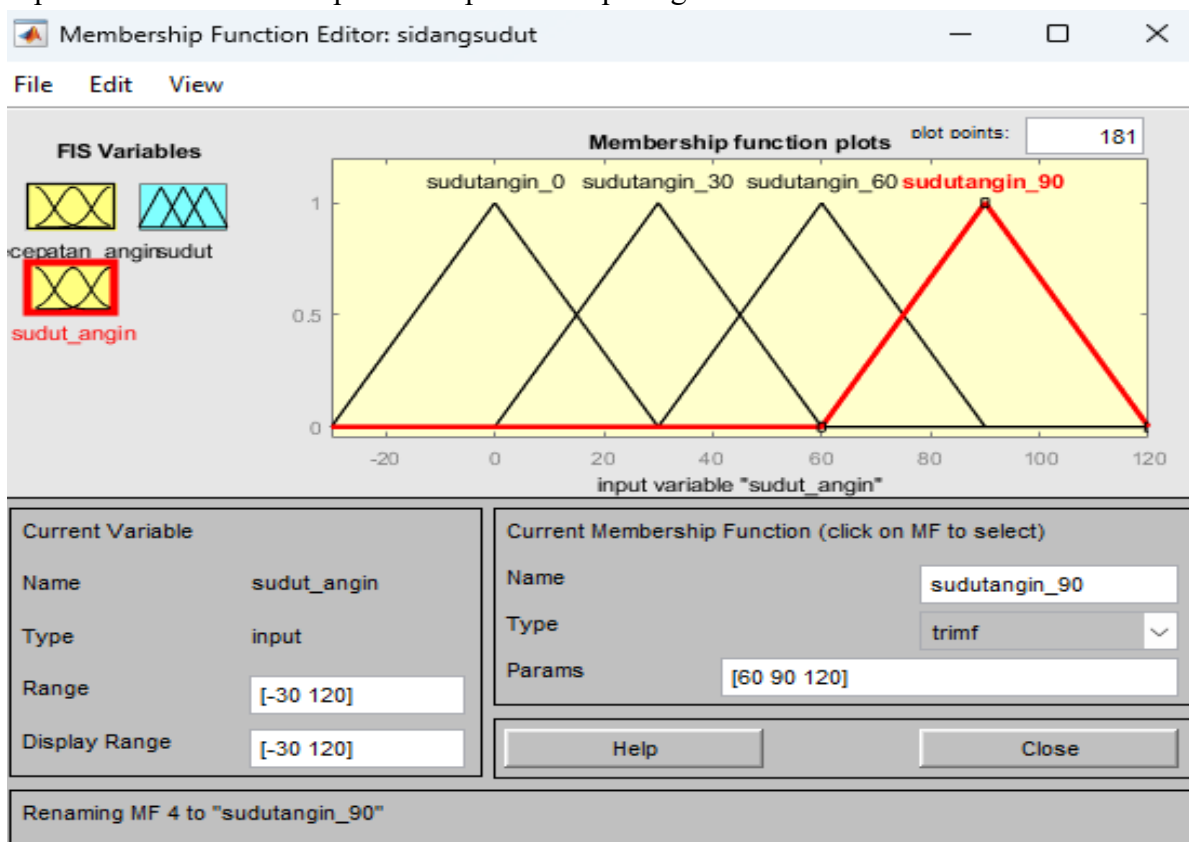
dengan menerapkan kecepatan angin pada nilai 0 – 10 m/s dengan kontroler logika fuzzy. Kecepatan angin untuk pengujian tersebut dilakukan pada interval 1 m/s.

Pengujian simulasi sudut pitch turbin angin dilakukan dengan memasukkan parameter tanda kecepatan angin dengan tanda rentang sebagai parameter masukan. Setelah parameter masukan, dilakukan proses simulasi untuk mengetahui parameter kinerja mekanik yang dihasilkan turbin angin dan momen inersia mekanik generator. Selanjutnya parameter koefisien kinerja ditentukan melalui proses simulasi yang dilakukan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan kontroler logika fuzzy pada kecepatan angin 0 m/s sampai 10 m/s dengan interval peningkatan kecepatan angin 1 m/s.

3. HASIL

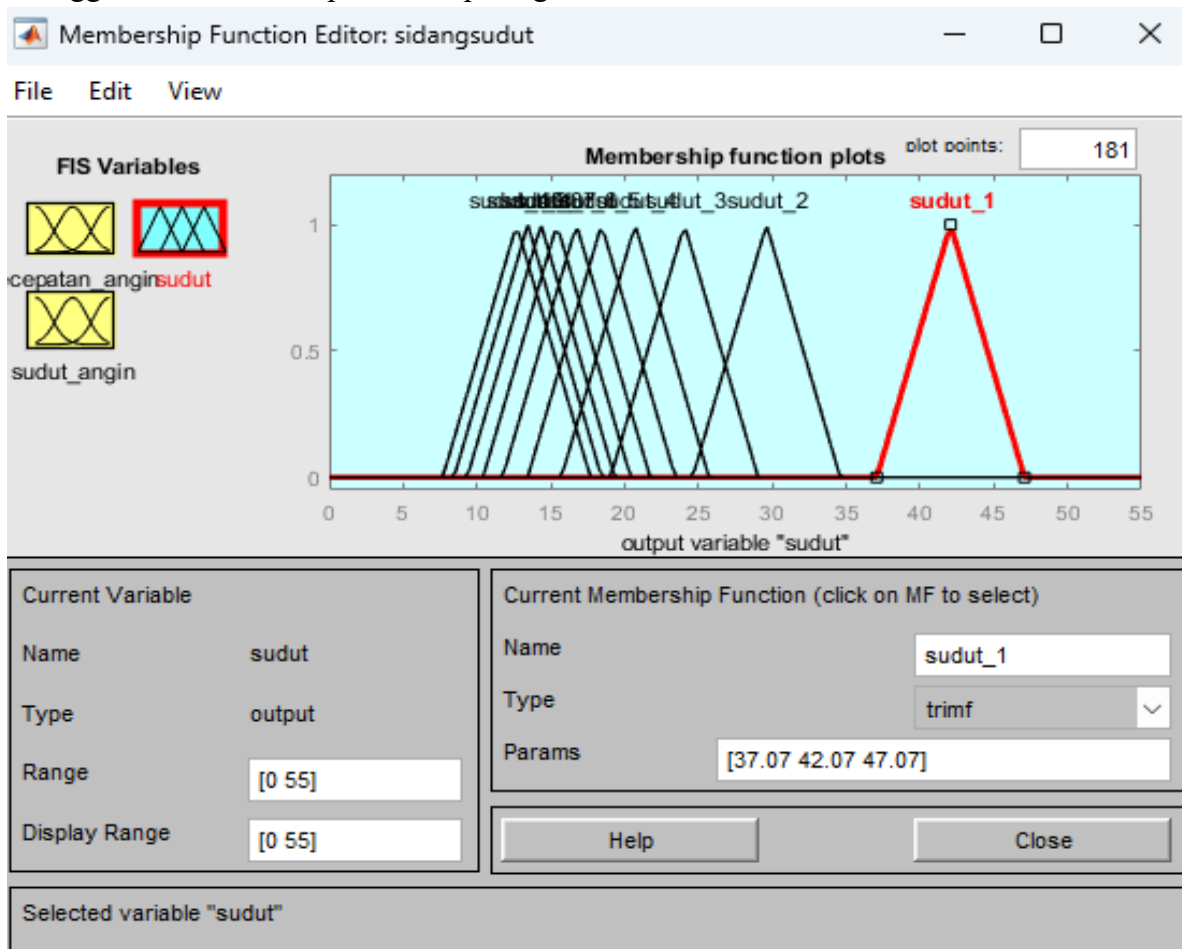
A. Pembuatan Fungsi Keanggotaan

Pengontrol Logika Fuzzy dapat mengatasi permasalahan tersebut yang terdiri dari tahap input, tahap pemrosesan, dan tahap output. Tahap input akan mengubah data tajam input menjadi representasi fuzzy yang menggabungkan ketidakjelasan dan ketidaktepatan dalam bahasa alami, untuk diproses lebih lanjut dalam Fuzzy Logic Controller. Tahap pemrosesan atau evaluasi aturan dilakukan untuk setiap aturan yang sesuai dan menghasilkan hasil untuk setiap fungsi keanggotaan, kemudian menggabungkan hasil aturan menggunakan metode keluaran Centroid atau tahap defuzzifikasi kemudian mengubah hasilnya kombinasi kembali ke nilai keluaran kontrol tertentu. Sumbu x pada fungsi keanggotaan menunjukkan sudut pitch sedangkan sumbu y menunjukkan nilai crisp. Terdapat 10 masukan fungsi keanggotaan dengan menggunakan fungsi keanggotaan triangle shape. Fungsi keanggotaan masukan dipetakan untuk nilai crisp value dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Fungsi Keanggotaan *Input*

Output dari fungsi keanggotaan juga berjumlah 10 dalam bentuk konstan. Masukan pada fungsi keanggotaan Kecepatan Angin dan keluaran fungsi keanggotaan adalah pitch. Fungsi keanggotaan keluaran dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan *Output*

Aturan pengontrol logika fuzzy berasal dari pengalaman dan pengetahuan tentang sistem. Penelitian ini menggunakan perancang logika fuzzy tipe Mamdani untuk mekanisme inferensi. Pengontrol logika fuzzy dengan mamdani akan memberikan output dengan mengikuti aturan yang telah dibuat. Adapun aturan pengendaliannya Logika fuzzy pada penelitian ini ditemukan pada tabel 1.

Tabel 1. Aturan Pengendali Logika Fuzzy

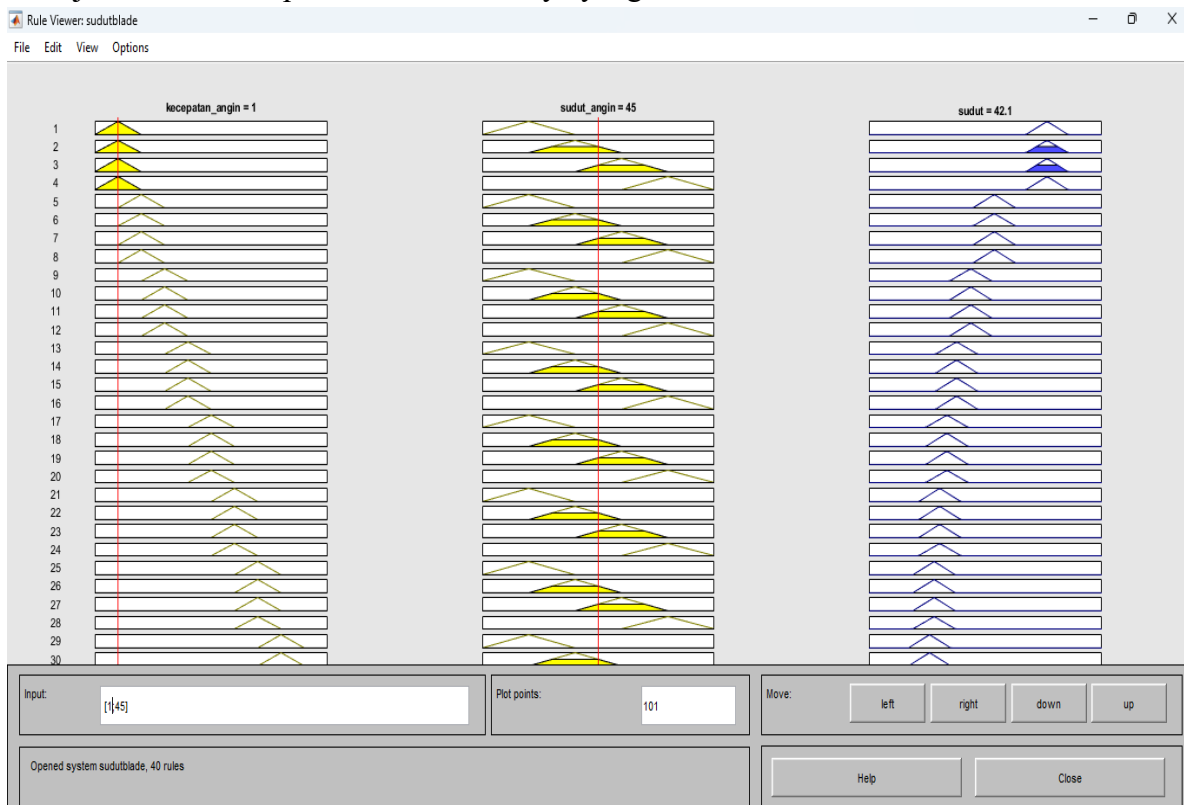
No	Masukan Kecepatan Angin (m/s)	Keluaran Sudut Bilah (Derajat)
1	1	42.071
2	2	29.597
3	3	24.04
4	4	20.712
5	5	18.428
6	6	16.7325
7	7	15.408
8	8	14.334
9	9	13.44
10	10	12.68

4. PEMBAHASAN

A. Pengujian Kecepatan Angin 1 m/s menggunakan Pengontrol Logika Fuzzy

Pengujian pertama dilakukan menggunakan pengontrol logika fuzzy dengan nilai kecepatan angin 1 m/s. Parameter keluaran yang dapat diamati adalah parameter sudut pitch. Parameter keluaran ini ditampilkan dalam bentuk kurva dan menunjukkan nilai. Nilai sudut pitch keluaran yang dihasilkan oleh kecepatan angin 1 m/s adalah sebesar 42,071 derajat. Hasil parameter sudut pitch keluaran yang dihasilkan pada pengujian pertama ditunjukkan pada gambar 4.

Nilai FIS parameter sudut pitch pada pengujian pertama ditunjukkan pada gambar 5. Nilai FIS pada gambar 5 terlihat bahwa parameter sudut pitch yang dihasilkan mempunyai nilai berkisar antara 0 sampai 42,071 derajat, dengan interval nilai kecepatan angin 0 sampai 1 m/s. Nilai input kecepatan angin sebesar 1 m/s dengan mengontrol besar sudut 42,071 derajat bertujuan untuk mempertahankan nilai daya yang dihasilkan sebesar 20.000 watt.



Gambar 4. Nilai FIS Parameter Sudut Pitch dengan Kecepatan Angin 1 m/s

B. Pengujian Kecepatan Angin 2 m/s Menggunakan Pengontrol Logika Fuzzy

Pengujian kedua dilakukan menggunakan pengontrol logika fuzzy dengan nilai kecepatan angin 2 m/s. Parameter keluaran yang dapat diamati adalah parameter sudut pitch. Parameter keluaran ini ditampilkan dalam bentuk kurva dan menunjukkan nilai. Nilai sudut pitch keluaran yang dihasilkan oleh kecepatan angin 2 m/s adalah sebesar 29,597 derajat. Hasil parameter sudut pitch keluaran yang dihasilkan pada pengujian kedua ditunjukkan pada gambar 5.

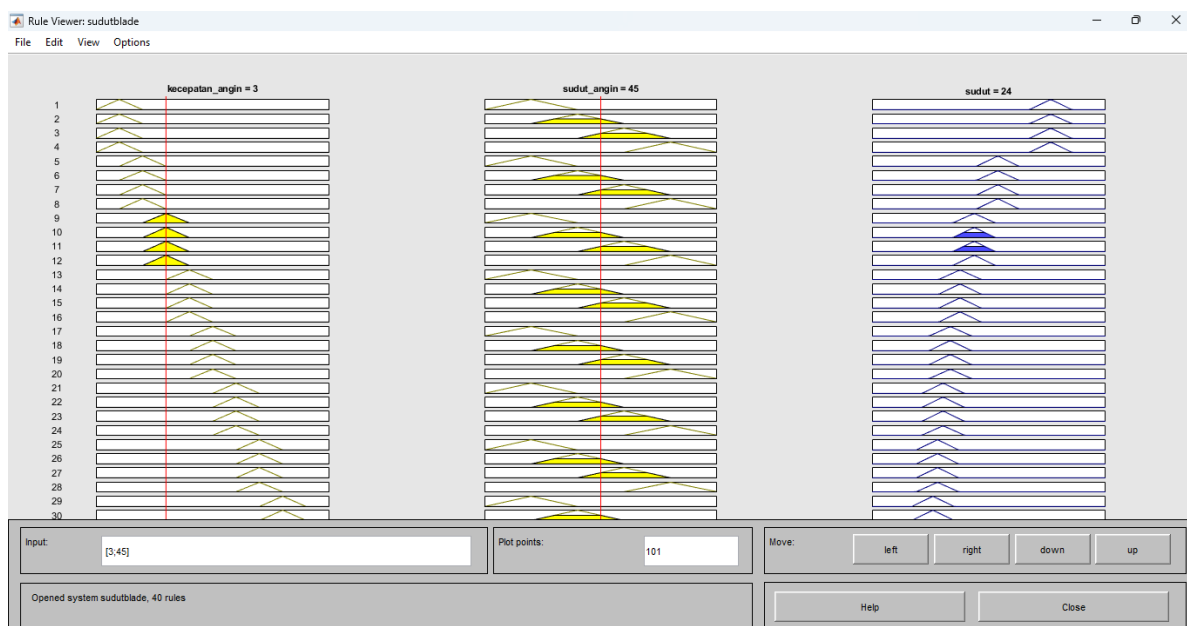
Nilai FIS parameter sudut pitch pada pengujian kedua ditunjukkan pada gambar 5. Nilai FIS pada gambar 6 terlihat bahwa parameter sudut pitch yang dihasilkan mempunyai nilai berkisar antara 0 sampai 29,597 derajat, dengan interval nilai kecepatan angin 0 sampai 2 m/s. Nilai input kecepatan angin sebesar 2 m/s dengan mengontrol besar sudut 29,597 derajat bertujuan untuk mempertahankan nilai daya yang dihasilkan sebesar 20.000 watt.



Gambar 5. Nilai FIS Parameter Sudut Pitch dengan Kecepatan Angin 2 m/s

C. Pengujian Kecepatan Angin 3 m/s Menggunakan Pengontrol Logika Fuzzy.

Pengujian ketiga dilakukan menggunakan pengontrol logika fuzzy dengan nilai kecepatan angin 3 m/s. Parameter keluaran yang dapat diamati adalah parameter sudut pitch. Parameter keluaran ini ditampilkan dalam bentuk kurva dan menunjukkan nilai. Nilai sudut pitch keluaran yang dihasilkan oleh kecepatan angin 3 m/s adalah sebesar 24,041 derajat. Hasil parameter sudut pitch keluaran yang dihasilkan pada pengujian ketiga ditunjukkan pada gambar 6.

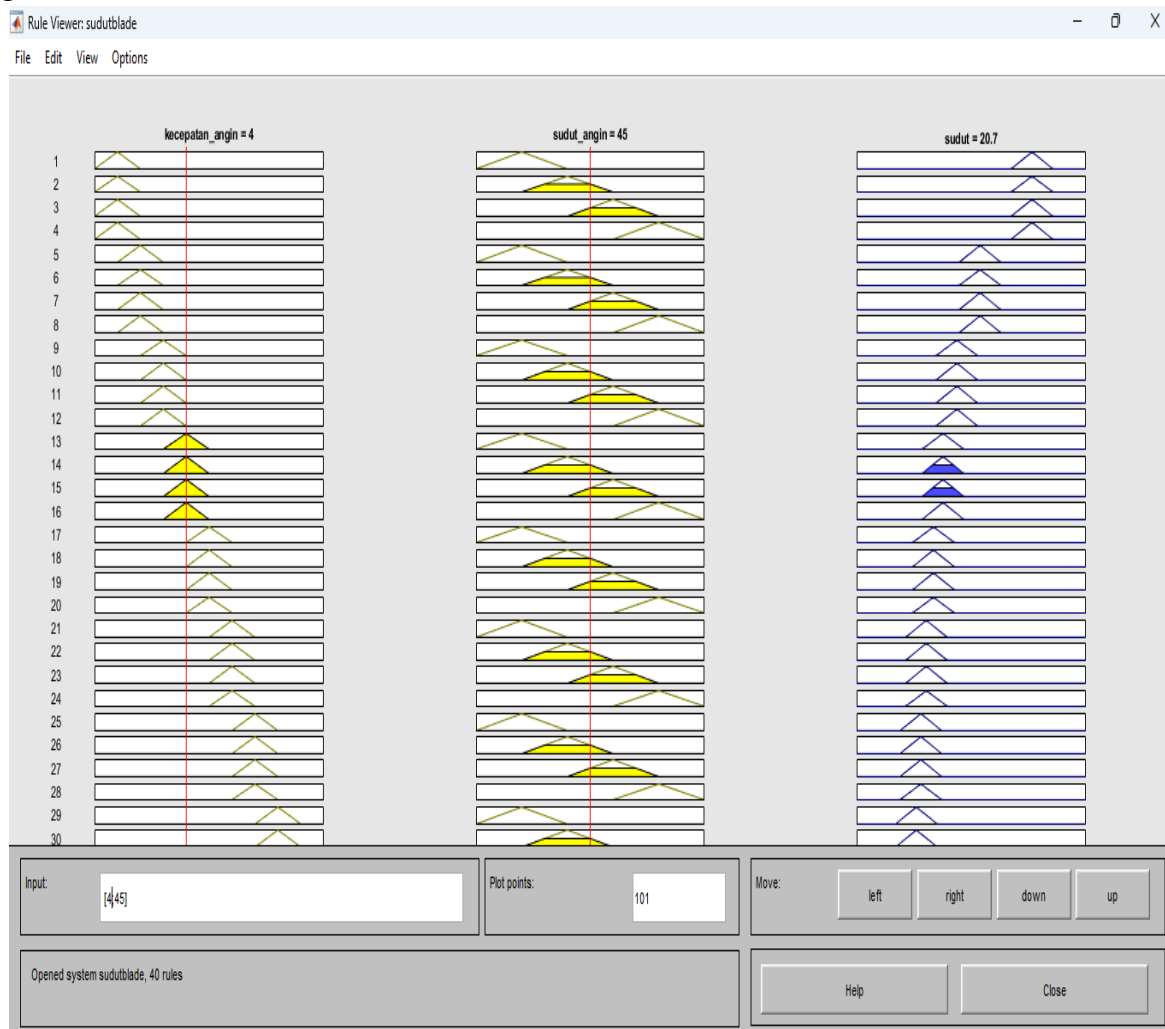


Gambar 6. Nilai FIS Parameter Sudut Pitch dengan Kecepatan Angin 3 m/s

Nilai FIS parameter sudut pitch pada pengujian ketiga ditunjukkan pada gambar 6. Nilai FIS pada gambar 6 terlihat bahwa parameter sudut pitch yang dihasilkan mempunyai nilai berkisar antara 0 sampai 24,041 derajat, dengan interval nilai kecepatan angin 0 sampai 3 m/s. Nilai input kecepatan angin sebesar 3 m/s dengan mengontrol besar sudut 24,041 derajat bertujuan untuk mempertahankan nilai daya yang dihasilkan sebesar 20.000 watt.

D. Pengujian Kecepatan Angin 4 m/s Menggunakan Pengontrol Logika Fuzzy

Pengujian keempat dilakukan menggunakan pengontrol logika fuzzy dengan nilai kecepatan angin 4 m/s. Parameter keluaran yang dapat diamati adalah parameter sudut pitch. Parameter keluaran ini ditampilkan dalam bentuk kurva dan menunjukkan nilai. Nilai sudut pitch keluaran yang dihasilkan oleh kecepatan angin 4 m/s adalah sebesar 20,712 derajat. Hasil parameter sudut pitch keluaran yang dihasilkan pada pengujian keempat ditunjukkan pada gambar 7.

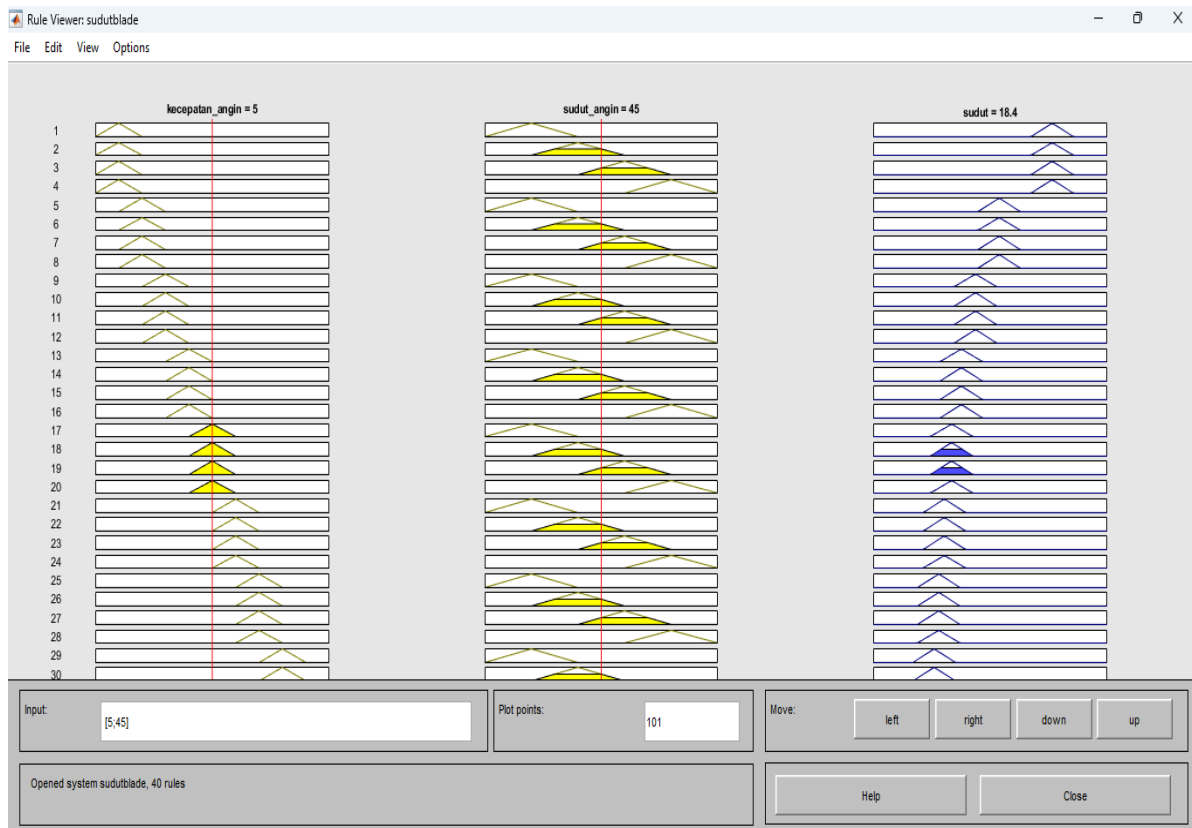


Gambar 7. Nilai FIS Parameter Sudut Pitch dengan Kecepatan Angin 4 m/s

Nilai FIS parameter sudut pitch pada pengujian keempat ditunjukkan pada gambar 7. Nilai FIS pada gambar 7 terlihat bahwa parameter sudut pitch yang dihasilkan mempunyai nilai berkisar antara 0 sampai 20,712 derajat, dengan interval nilai kecepatan angin 0 sampai 4 m/s. Nilai input kecepatan angin sebesar 4 m/s dengan mengontrol besar sudut 20,712 derajat bertujuan untuk mempertahankan nilai daya yang dihasilkan sebesar 20.000 watt.

E. Pengujian Kecepatan Angin 5 m/s Menggunakan Pengontrol Logika Fuzzy

Pengujian kelima dilakukan menggunakan pengontrol logika fuzzy dengan nilai kecepatan angin 5 m/s. Parameter keluaran yang dapat diamati adalah parameter sudut pitch. Parameter keluaran ini ditampilkan dalam bentuk kurva dan menunjukkan nilai. Nilai sudut pitch keluaran yang dihasilkan oleh kecepatan angin 5 m/s adalah sebesar 18,428 derajat. Hasil parameter sudut pitch keluaran yang dihasilkan pada pengujian kelima ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Nilai FIS Parameter Sudut Pitch dengan Kecepatan Angin 5 m/s

Nilai FIS parameter sudut pitch pada pengujian kelima ditunjukkan pada gambar 8. Nilai FIS pada gambar 8 terlihat bahwa parameter sudut pitch yang dihasilkan mempunyai nilai berkisar antara 0 sampai 18,428 derajat, dengan interval nilai kecepatan angin 0 sampai 5 m/s. Nilai input kecepatan angin sebesar 5 m/s dengan mengontrol besar sudut 18,428 derajat bertujuan untuk mempertahankan nilai daya yang dihasilkan sebesar 20.000 watt. Temuan dari penelitian juga ditambahkan. Temuan penelitian ini berupa pemodelan sistem kontrol sudut menggunakan *fuzzy logic* dalam mencapai daya konstan.

5. KESIMPULAN

Pengujian yang telah dilakukan mengandung beberapa aspek yang berkaitan dengan kestabilan nilai daya yang diinginkan. Diperlukan sistem sudut pitch blade turbin angin sumbu vertikal dengan fuzzy logic controller sebagai acuan untuk mendapatkan nilai daya keluaran yang stabil sebesar 20.000 Watt. Pada pengujian kecepatan angin sebagai input, diperlukan penyesuaian sudut Pitch Blade yang besar agar nilai daya tetap terjaga. parameter sudut pitch sebagai parameter keluaran mekanis berbanding terbalik dengan parameter kecepatan angin sebagai parameter masukan. Input kecepatan angin dengan nilai 10 m/s merupakan kecepatan terukur dan input kecepatan angin dengan nilai 10 m/s merupakan kecepatan Cut Off. Tujuan penelitian adalah pemodelan kontrol sudut blade menggunakan fuzzy logic dalam menjaga daya konstan.

REFERENSI

- [1] F. F. Ghaniyyu and N. Husnita, 'Upaya Pengendalian Perubahan Iklim Melalui Pembatasan Kendaraan Berbahan Bakar Minyak di Indonesia Berdasarkan Paris

- Agreement', *Moral. J. Ilmu Huk.*, vol. 7, no. 1, p. 110, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.52947/morality.v7i1.196>
- [2] D. Corio, R. Maulana, P. Yunesti, and Z. Hendri, *Perencanaan dan Operasi Perencanaan dan Operasi Sistem Tenaga Listrik*. <https://press.itera.ac.id/perencanaan-dan-operasi-sistem-tenaga-listrik/>
- [3] D. A. Wardana, 'Pengaturan Hukum tentang Pemanfaatan Biogas Sebagai Energi Terbarukan Dalam Mendorong Ekonomi Hijau (Green Economy) di Indonesia', *J. Bevind.*, vol. 1, no. 05, pp. 27–42, 2023. <https://www.journal.uniba.ac.id/index.php/JB/article/view/897>
- [4] M. Ali, H. Nurohma, D. Ajiatmo, and M. A. Haikal, *Desain PID Controller untuk Temperatur Heating Furnace Menggunakan Metode PSO*. *ALINIER Journal of Artificial Intelligence & Applications* 2(2):77-82 doi: <http://dx.doi.org/10.36040/aliner.v2i2.5162>
- [5] E. Dwy and A. A. Za, 'Simulasi Pengontrol Logika Fuzzy Sudut Pitch Blade pada Turbin Angin Menggunakan Simulink MATLAB Simulation of Blade Pitch Angle Fuzzy Logic Controller in Wind Turbine Using Simulink MATLAB', *Telekontran*, vol. 10, no. 2, 2022. doi: <https://doi.org/10.34010/telekontran.v10i2.9264>
- [6] D. Rahmawati, M. Farisal, K. Joni, K. Kunci, and B. Converter, 'Lantai Pembangkit Listrik Menggunakan Piezoelektrik dengan Buck Converter LM2596'. *JEAI*, Vol 7, No 3, 2021, pp. 84-89, doi: <https://doi.org/10.19184/jaei.v7i3.28128>
- [7] Hidayat, M.N. et al. 2022. Sistem Kontrol Sudut Pitch Bilah Turbin Angin Menggunakan Logika Fuzzy Untuk Variable Speed Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). *Jurnal ELTIKOM: Jurnal Teknik Elektro, Teknologi Informasi dan Komputer*. 6, 2 (Nov. 2022), 210–225. DOI: <https://doi.org/10.31961/eltikom.v6i2.571>
- [8] N. Nuryanti, A. Salam, and A. Julianto, 'Simulasi Pengujian Kinerja Kendali Pitch Turbin Angin Berbasis Matlab Simulink', *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 7, no. 2, p. 237, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.24036/jtev.v7i2.113214>
- [9] E. Chavero-Navarrete, M. Trejo-Perea, J. C. Jáuregui-Correa, R. V. Carrillo-Serrano, G. Ronquillo-Lomeli, and J. G. Ríos-Moreno, 'Pitch Angle Optimization For Small Wind Turbines Based On A Hierarchical Fuzzy-PID Controller And Anticipatedwind Speed Measurement', *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 4, pp. 1–21, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/app11041683>
- [10] W. Hadi, G. A. Rahardi, and T. Suhanto, 'Analisis Pengaruh Kerangka Penyusun Aluminium pada Generator Axial Flux 3 Fasa Double Rotor Stator Tunggal Dengan Kutub U-S Magnet Ferrite', vol. 09, no. 03, pp. 81–85, 2023, doi: <http://dx.doi.org/10.19184/jaei.v9i3.32632>
- [11] I. W. S. Yasa, 'Optimalisasi Penghematan Power Supply (Ps) Pembangkit dengan Menggunakan Preheater Auto Thermal PLTDG Pesanggaran', *JEAI*, Vol 8, No 2, 2022, pp. 84-89, pp. 47–51. doi: <https://doi.org/10.19184/jaei.v8i2.31591>
- [12] M. Diah Ika Putri, A. Ma'arif, and R. Dwi Puriyanto, 'Pengendali Kecepatan Sudut Motor DC Menggunakan Kontrol PID dan Tuning Ziegler Nichols', *Techno (Jurnal Fak. Tek. Univ. Muhammadiyah Purwokerto)*, vol. 23, no. 1, 2022, doi: <http://dx.doi.org/10.30595/techno.v23i1.10773>

- [13] G. Toldo and A. Triyanto, 'Rancang Bangun Mesin Listrik Pemotong Rumput Menggunakan Control Arduino', OKTAL J. Ilmu Komput. dan Sci., Vol. 1, No. 03, pp. 271–282, 2022. <https://journal.mediapublikasi.id/index.php/oktal/article/view/63>
- [14] S. Nurcahyo, D. A. Permatasari, and A. M. Wiradana, 'Penerapan Fuzzy Logic untuk Meningkatkan Efisiensi Proses Pembuatan Garam', Vol. 11, No. 03, 2024, pp. 797-805, doi: <http://dx.doi.org/10.33795/elkolind.v11i3.5477>
- [15] N. Technology et al., 'Pengaruh Parameter Pid Kontroler Pada Alat Pemanas Air Otomatis', J. CONTEN: Computer and Network Technology, Vol. 4, No. 1, pp. 71–80, 2024. doi: <https://doi.org/10.31294/conten.v4i1.3604>
- [16] A. H. Dimasqi, 'Peningkatan Fungsi Instalasi Pompa Air Berbasis Panel Surya Di Desa Banyuglugur Kabupaten Situbondo', JEAI, Vol 8, No 2, 2022, pp. 59–64. doi: <https://doi.org/10.19184/jaei.v8i2.29705>