

Sistem *Speed Sensorless Vertical Axis Wind Turbine* dengan Fuzzy Time Series Model Chen

Oktriza Melfazen¹, Denda Dewatama², M. Taqijuddin Alawiy³

e-mail: oktriza.melfazen@unisma.ac.id, denda.dewatama@polinema.ac.id, taqijuddin.alawiy@unisma.ac.id

^{1,3} Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Malang, Jalan MT. Haryono No. 193 Malang, Indonesia

²Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Jalan Soekarno Hatta No.9 Malang, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 5 Juni 2024

Direvisi 20 Agustus 2024

Diterbitkan 30 September 2024

Kata kunci:

Turbin Angin Sumbu Vertikal
Prediksi Tanpa Sensor
Kecepatan
Fuzzy Time Series Chen

ABSTRAK

Pemanfaatan energi angin sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu di wilayah Indonesia perlu pengolahan dengan cermat, karena kecepatan angin rata-rata harian yang berkisar antara 2,5 – 6 m/s merupakan kategori kecepatan angin kelas rendah hingga menengah. Penelitian tentang prediksi kecepatan angin pada Vertical-Axis Wind Turbine (VAWT) menggunakan klasifikasi fuzzy time series ini dimaksudkan untuk menggantikan sensor kecepatan dalam mendeteksi dan mendapatkan potensi kecepatan angin terbaik untuk menghasilkan tegangan listrik maksimal sepanjang catur wulan pertama dalam satu tahun. Algoritma fuzzy time series Chen mampu melakukan prediksi kecepatan angin untuk menghasilkan tegangan listrik pada sistem VAWT 800 Watt sehingga sistem dapat beroperasi dengan mode tanpa sensor namun tetap dapat mengukur kecepatan angin dengan akurasi hingga 70%.

ABSTRACT

The utilization of wind energy as a Wind Power Plant in the territory of Indonesia needs careful processing, since the average daily wind speed ranging from 2.5 - 6 m/s is a low to medium-class wind speed category. Research on wind speed prediction on Vertical-Axis Wind Turbines (VAWT) using fuzzy time series classification is intended to replace the speed sensor in detecting and obtaining the best potential wind speed to produce maximum electrical voltage during the year's first quarter. Chen's fuzzy time series algorithm can predict the wind speed to produce a voltage on the 800 Watt VAWT system so that the system can operate in sensorless mode but still measure wind speed with an accuracy of up to 70%.

Keywords:

Vertical Axis Wind Turbine
Speed Sensor-less Prediction
Fuzzy Time Series Chen

Penulis Korespondensi:

Oktriza Melfazen,
Jurusan Teknik Elektro,
Universitas Islam Malang,
Jl. MT. Haryono No. 193, Malang, Jawa Timur, Indonesia, 65144.
Email: oktriza.melfazen@unisma.ac.id
Nomor HP/WA aktif: +61 823 3768 1978



1. PENDAHULUAN

Energi angin merupakan energi alternatif yang ramah lingkungan, bebas polusi emisi CO₂, sumber daya yang tidak terbatas, handal dan mudah didapatkan. Bervariasinya kondisi lingkungan tiap wilayah di Indonesia, menentukan ketersediaan sumber energi angin [1]. Dengan demikian dalam pemanfaatan energi angin menjadi energi listrik, selain membutuhkan turbin angin dan generator listrik juga perlu dilakukan pengukuran terhadap kecepatan angin yang dapat ditangkap oleh turbin [2]. Pengukuran kecepatan angin biasanya memanfaatkan sensor kecepatan angin. Namun penempatan sensor yang harus berada bersama turbin angin di kondisi ruang terbuka dengan perubahan cuaca, suhu dan faktor lainnya secara terus menerus dalam waktu lama dapat menurunkan efektivitas kerja dan masa pakai sensor. Adapun deteksi kecepatan angin adalah suatu hal penting dalam sebuah sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), untuk itu perlu disediakan solusi untuk menggantikan kinerja sensor dengan memanfaatkan metode tertentu berbasis kecerdasan buatan. Beberapa metode penggantian sensor untuk melakukan deteksi yang pernah diteliti antara lain deteksi kesalahan tanpa sensor sistem fotovoltaik melalui pemetaan karakteristik yang melekat pada lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya [3], Evaluasi uji berkendara metode deteksi kendaraan tanpa sensor untuk transfer daya nirkabel bergerak [4]. Tinjauan teknik pengendalian tanpa sensor juga sudah diterapkan pada pengendali *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) [5].

Penelitian diharapkan untuk mendapatkan prediksi kecepatan angin guna menghasilkan tegangan listrik berdasarkan pengukuran kecepatan angin tanpa sensor kecepatan pada sistem *Vertical-Axis Wind Turbine* (VAWT) dengan pengklasifikasian oleh *fuzzy time series* agar penyerapan energi angin untuk menghasilkan daya keluaran dapat selalu termonitor secara terus menerus dan *real time*. Realisasinya dengan mendesain sebuah prototipe sistem VAWT 800 Watt dengan keterukuran pergerakan angin untuk menghasilkan tegangan dengan metode tanpa sensor kecepatan (*speed sensor-less*) yang terpantau berdasarkan klasifikasi oleh *fuzzy time series model Chen*. Fuzzy telah digunakan untuk melakukan prediksi sehingga dapat menggantikan fungsi sensor dalam sistem antara lain pada penelitian tentang metode deteksi tabrakan tanpa sensor untuk robot dengan dinamika tak tentu berbasis logika fuzzy [6] dan desain kontroler logika fuzzy untuk kontrol kecepatan penggerak motor BLDC tanpa sensor [7].

2. METODE PENELITIAN

2.1 *Vertical-Axis Wind Turbine*

Energi adalah potensi yang dimiliki untuk melakukan sesuatu yang tersimpan dalam beberapa bentuk [8]. Berbagai jenis energi dapat dimanfaatkan diantaranya, energi potensial dan energi kinetik. Pemanfaatannya semakin banyak dikembangkan secara maksimal untuk keperluan manusia karena merupakan jenis energi terbarukan yang efektif untuk mengurangi dampak perubahan iklim, meningkatkan tingkat keamanan energi, dan mendukung industri rendah karbon [9]. Sumber utama energi angin adalah matahari yang terjadi karena adanya perbedaan tekanan diantara permukaan bumi akibat perbedaan radiasi panas yang diterima berbagai area di permukaan bumi [10].

Turbin angin adalah alat mekanik yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik [11]. *Vertical-Axis Wind Turbine* (VAWT) atau turbin angin sumbu vertikal adalah jenis turbin angin yang tepat digunakan pada daerah dengan kecepatan angin rendah. Memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus, dengan kelebihan utama tidak harus diarahkan ke arah angin berhembus agar bekerja secara efektif. Demikian juga generator serta *gearbox* pada VAWT bisa ditempatkan dekat tanah, sehingga lebih mudah diakses ketika perlu perawatan atau perbaikan dan biaya perawatan lebih rendah dan efisien. VAWT mampu memanfaatkan angin dari berbagai arah [12].

VAWT tipe Savonius adalah jenis turbin angin sumbu vertikal paling sederhana yang dapat berputar karena gaya dorong angin terhadap bagian permukaan cekung dari blade, sehingga rotor tidak akan melebihi kecepatan angin. VAWT Savonius cocok untuk aplikasi daya rendah dan digunakan pada kecepatan angin yang berbeda [13], dengan keunggulan fabrikasi yang mudah, bahkan dalam beberapa aplikasi skala kecil turbin angin Savonius dapat dibuat memanfaatkan bahan bekas [14]. Salah satu faktor yang dipertimbangkan dalam penggunaan turbin angin



adalah teknologi generator yang dapat dijalankan pada kecepatan tetap atau variatif. Tiga jenis generator untuk sistem turbin angin yaitu generator DC, generator AC sinkron dan generator AC asinkron [15].

2.2 Fuzzy Time Series Model Chen Sebagai Pendeteksi Kecepatan Angin

Pada aplikasi daya sedang dan rendah, lebih dipilih menggunakan teknik tanpa sensor dengan tujuan mengurangi biaya implementasi dan pemeliharaan, memungkinkan pengendalian vektor dari mesin dari perkiraan posisi dan kecepatan [16]. Metode kontrol tanpa sensor yang paling banyak digunakan untuk PMSG bertujuan untuk mendeteksi posisi pada berbagai kecepatan, antara lain penerapan fungsi *Lyapunov* kontrol waktu terbatas [17], *Phase Locked Loop* (PLL) [18], *Linear Matrix Inequality Approach* [19].

Time series adalah himpunan observasi data terurut dalam waktu. Untuk melakukan prediksi, diperlukan analisis terhadap data *time series* agar didapat pola data masa lampau. Untuk melakukan analisis terhadap data *time series*, perlu diperhatikan bentuk pola data [20]. Peramalan menggunakan metode kuantitatif bisa diterapkan jika terdapat kondisi ketersediaan informasi masa lalu yang disajikan dalam bentuk data numerik, dan diasumsikan bahwa beberapa aspek pola masa lalu akan berlanjut di masa datang [21].

Fuzzy time series merupakan konsep peramalan menggunakan logika *Fuzzy*. Peramalan *time series* mampu memberikan penjelasan pada data yang samar dan disajikan dalam nilai-nilai linguistik [22]. Beberapa pengembangan *Fuzzy Time Series* antara lain model Song dan Chissom, model Jasim, model Box-Jenkins, model Markov, model Cheng dan model Chen. Kelebihan *Fuzzy time series* model Chen adalah operasi sederhana dalam matriks kompleks. Sejumlah penelitian menggunakan metode *Fuzzy time series* model Chen untuk membahas permasalahan tertentu, antara lain perbandingan metode deret waktu fuzzy Chen, Cheng dan rantai Markov dalam prediksi curah hujan [23]. Sebuah survei tentang desain model peramalan *fuzzy time series* dilakukan oleh Bose dan Mali [24]. *Very short-term solar forecasting using fuzzy time series* [25]. Pada penelitian-penelitian tersebut menunjukkan *Fuzzy time series* disarankan untuk digunakan karena cenderung mendapatkan nilai *error* yang kecil. Tahap-tahap peramalan dengan *Fuzzy time series* model Chen [26] sebagai berikut:

1. Menentukan Semesta Pembicaraan U (*Universe of Discourse*),

$$U = [D_{min} - D_1, D_{max} + D_2] \tag{1}$$

yang akan dibagi menjadi interval dengan jarak yang sama dan digunakan sebagai himpunan untuk data yang sebenarnya. D_1 dan D_2 adalah dua angka positif sembarang. Sedangkan D_{min} dan D_{max} adalah nilai data terkecil dan terbesar.

2. Pembentukan Interval, himpunan semesta dibagi menjadi beberapa interval dengan jarak yang sama menggunakan aturan berikut :

$$\text{Jumlah Interval} = 1 + 3,322 \log (n) \tag{2}$$

n adalah jumlah data observasi. Kemudian tentukan Panjang Interval dengan rumus :

$$\text{Panjang Interval} = \frac{D_{max}-D_{min}}{\text{jumlah kelas}} \tag{3}$$

Sehingga membentuk sejumlah nilai linguistik untuk mempresentasikan suatu himpunan *fuzzy* pada interval-interval yang terbentuk dari himpunan semesta (U),

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \tag{4}$$

dengan U adalah himpunan semesta, dan u_i adalah jarak pada U , untuk $i = 1, 2, \dots, n/$

3. Mendefinisikan himpunan *Fuzzy*, himpunan semesta yang telah terbagi dibentuk menjadi himpunan *fuzzy* berdasarkan interval yang telah diperoleh. Misalkan A_1, A_2, \dots, A_n adalah himpunan *fuzzy* yang terdiri dari nilai linguistik dari suatu variabel linguistik.

$$\begin{aligned} A_1 &= 1/u_1 + 0.5/u_2 + 0/u_3 + 0/u_4 + 0/u_5 \dots + 0/u_p \\ A_2 &= 0.5/u_1 + 1/u_2 + 0.5/u_3 + 0/u_4 + 0/u_5 \dots + 0/u_p \\ A_3 &= 0/u_1 + 0.5/u_2 + 1/u_3 + 0.5/u_4 + 0/u_5 \dots + 0/u_p \end{aligned} \tag{5}$$

·
·
·



$$A_p = 0/u_1 + 0/u_2 + 0/u_3 \dots , 5/u_{p-1} + 1/u_p$$

Dengan u_i ($i=1,2,\dots,p$) adalah elemen dari U dan bilangan dengan simbol $—/|$ menyatakan derajat keanggotaan $\mu_{A_i}(u_i)$ terhadap A_i ($i=1, 2, \dots,p$) yang nilainya 0, 0,5 atau 1. Proses fuzzifikasi data historis dimulai setelah menerima data input, sistem menentukan nilai fungsi keanggotaan dan mengklasifikasikan data sesuai interval yang telah ditentukan untuk mengubah variabel numerik (non-fuzzy) menjadi variabel linguistik (fuzzy).

4. Membuat tabel *Fuzzy Logical Relationsip* (FLR) berdasarkan data historis. FLR $A_j \rightarrow A_k$ berarti jika nilai *enrollment* pada tahun I adalah A_j maka pada tahun $i+1$ adalah A_k . A_j sebagai sisi kiri *relationship* disebut *current state* dan A_k sebagai sisi kanan *relationship* disebut *next state*. Dan jika terjadi perulangan hubungan maka tetap dihitung sekali.
5. Mengklasifikasikan FLR yang telah diperoleh ke dalam grup-grup sehingga terbentuk *Fuzzy Logical Relationship Group* (FLRG) dan mengkombinasikan hubungan yang sama.
6. Melakukan Defuzzifikasi, yaitu proses perhitungan hasil output peramalan untuk mendapatkan hasil bilangan *crisp*, kemudian ditambahkan dengan data aktual pada waktu sebelumnya sehingga didapatkan hasil bilangan peramalan. Nilai peramalan *Fuzzy time series* model Chen berasal dari nilai tengah setiap interval pada FLRG yang dibentuk pada tahap sebelumnya. Ketepatan metode deteksi dinilai dengan model deret waktu, dikatakan baik jika telah mendekati kenyataan. Hal tersebut dilihat pada kesalahan (*error*) semakin kecil. Ketepatan model peramalan dihitung dengan menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebagai berikut:

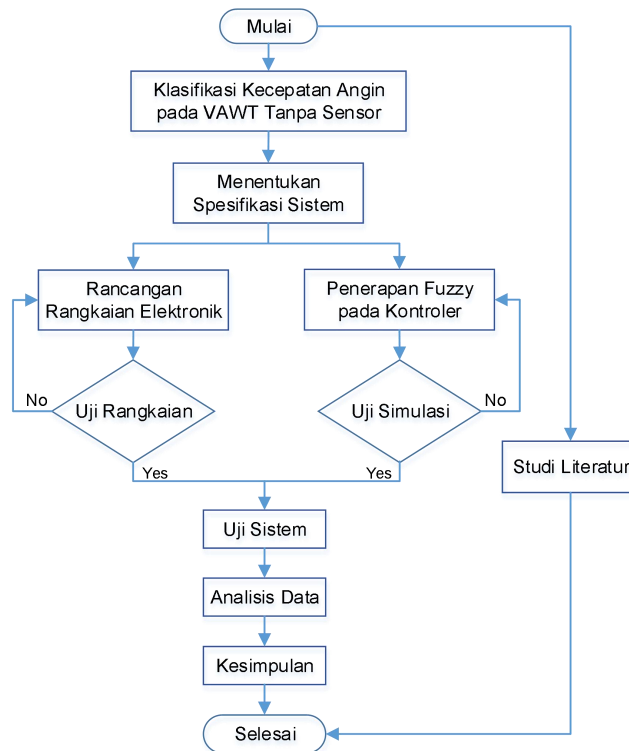
$$MAPE = \sum_{n=1}^t \frac{|PE_i|}{n} \tag{6}$$

PE_i adalah $(\frac{x_t f_t}{x_t}) (100)$ dan n adalah jumlah pengamatan. X_t adalah data aktual pada periode ke- t ; f_t adalah nilai hasil model pada periode ke- t ; n adalah banyaknya data.

2.3 Perancangan Sistem

Sistem *Vertical Axis Wind Turbine* dibangun tanpa sensor kecepatan dengan pertimbangan peletakan sensor pada ruang terbuka membuat sensor lebih cepat mengalami kerusakan dan penurunan efektivitas kerjanya. Untuk menggantikan kinerja sensor tersebut, dilakukan pengklasifikasian kecepatan angin menggunakan *Fuzzy Time Series* pada sistem kontrolnya sehingga tegangan yang dihasilkan tetap dapat dipantau dan dikontrol sesuai keperluannya.



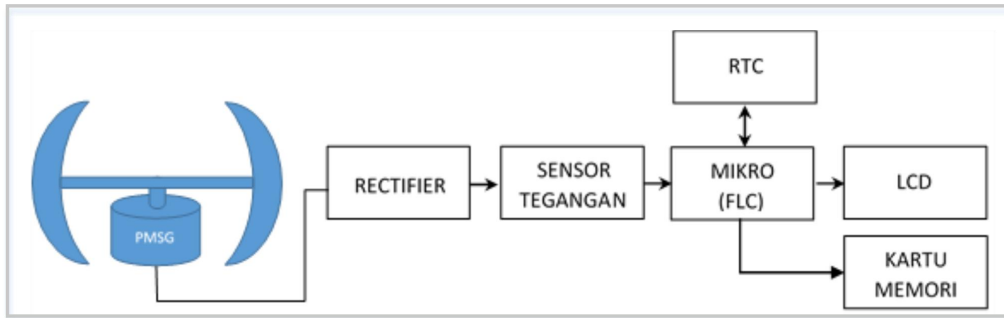


Gambar 1. Diagram Alir Proses Penelitian

Proses penelitian digambarkan dalam diagram alir penelitian pada Gambar 1. Ditetapkan sejumlah variabel yang dimanipulasi untuk mempelajari hubungan sebab-akibat. Variabel bebas berupa kecepatan angin. Menurut Badan Pusat Statistik Malang, rerata kecepatan angin di Kabupaten Malang (10 meter diatas permukaan tanah) antara bulan Juli hingga Februari adalah $2,8 \text{ m/s}$. Bulan *paling berangin* dalam setahun adalah *September* dengan kecepatan angin rata-rata $3,66 \text{ m/s}$. Antara Maret hingga Juni kecepatan angin rata-rata $1,9 \text{ m/s}$. Tegangan (V) yang dihasilkan generator VAWT 800 watt adalah hasil konversi energi angin.

Desain elektronik sistem yang perlu direalisasikan digambarkan dalam bentuk diagram blok pada Gambar 2. *Wind Turbine* digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik, dengan menggunakan prinsip konversi energi yang dihasilkan dari energi gerak angin menjadi energi listrik. Digunakan *wind turbine* model *vertical axis* dengan 5 bilah. Instalasi posisi turbin angin 10 meter dari permukaan tanah. Energi yang dihasilkan tersebut disalurkan ke generator untuk membangkitkan tenaga listrik, menggunakan *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* sebagai pengubah kecepatan angin yang ditangkap menjadi energi listrik. Tenaga listrik yang telah dibangkitkan tersebut akan diproses oleh mikrokontroler sebagai pengendali sistem dengan menanamkan metode *fuzzy time series* untuk melakukan klasifikasi nilai kecepatan pergerakan angin dari *wind turbine*. Hasil pengontrolan diamati melalui LCD. Dengan observasi berkala terhadap sistem, diamati korelasi antara variabel satu dengan variabel lain, yang besar kecilnya ditentukan oleh koefisien korelasi. Dalam hal ini variabel yang diteliti adalah pengaruh klasifikasi oleh *fuzzy time series Chen* dalam mengidentifikasi kecepatan pergerakan angin dari *wind turbine*.



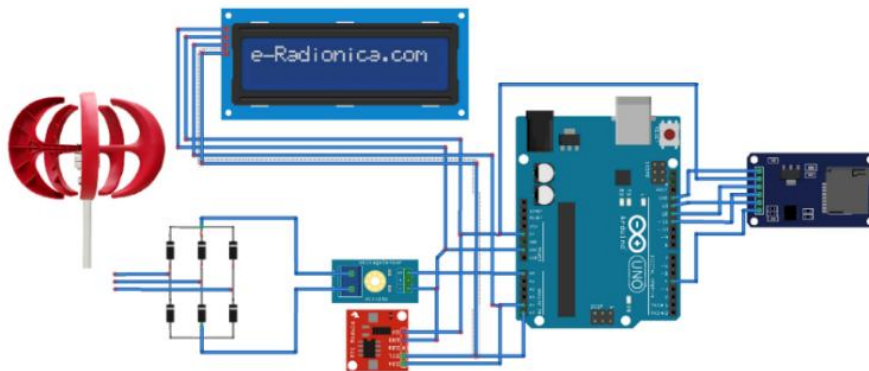


Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Sistem dibangun dengan menetapkan sejumlah spesifikasi kerja berikut :

1. Bagian input, terdiri dari (a) VAWT daya maksimal 800 watt, tegangan kerja 12 volt, kecepatan angin maksimal 45 m/s, kecepatan angin optimal 12 m/s, kecepatan angin inisial 2 m/s, 5 bilah dengan panjang 600 mm, diameter 900 mm, material nylon fiber, temperature operasi -40°C sampai 80°C; (b) Generator, jenis Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG).
2. Bagian pengendali. Mikrokontroler merupakan pengendali sistem secara keseluruhan, menggunakan Arduino Mega. Pada mikrokontroler ditanamkan program *Fuzzy time series* model Chen untuk mengenali kecepatan angin yang ditangkap oleh turbin angin.
3. Bagian output, terdiri dari (a) Kartu Memori sebagai tempat penyimpanan data kecepatan angin; (b) RTC (*Real Time Clock*); (c) LCD (*Liquid Crystal Display*) sebagai penampil hasil pengenalan tegangan.

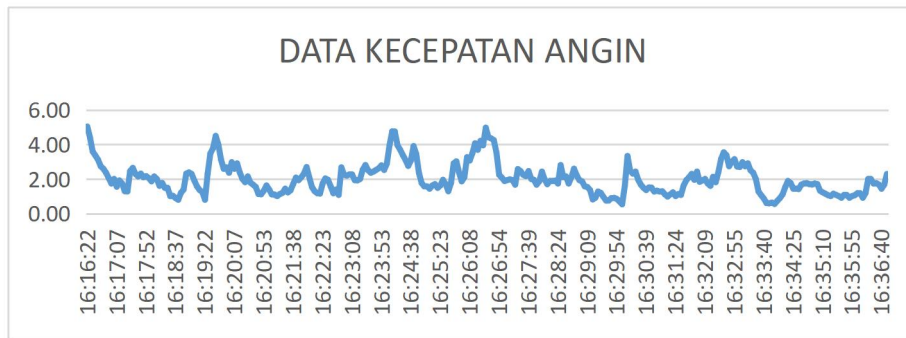
2.4 Implementasi Fuzzy Time Series Model Chen Pada Sistem VAWT



Gambar 3. Rangkaian Sistem Keseluruhan

Gambar 3 merupakan rangkaian sistem yang dibentuk. Gambar 4 menampilkan cuplikan data kecepatan angin yang didapat dengan waktu pengambilan data tiap 5 detik (300 data) dari total waktu pengamatan jam 16.16 WIB sampai dengan 16.36 WIB. *Range* waktu di atas diambil karena terjadi banyak perubahan kecepatan angin. Data angin didapatkan secara *realtime* pada 562 mdpl dengan ketinggian turbin 10 meter dari permukaan tanah.





Gambar 4. Plot data kecepatan angin

Fuzzy Time Series Chen diimplementasikan dalam mikrokontroler sebagai berikut:

1. Menentukan semesta pembicaraan U (*Universe of Discourse*), dibentuk dari data aktual yang tersedia, $[D_{\min}; D_{\max}]$ didefinisikan sesuai rumus (1). Berdasarkan data Gambar 4 nilai kecepatan angin tertinggi adalah 5,04 m/s dan kecepatan angin terendah adalah 0,54 m/s. Himpunan semesta $U = [0,54; 5,04]$.
2. Pembentukan Interval, menentukan jumlah kelas interval dengan rumus (2) didapat sebesar 9,17 dibulatkan menjadi 9 dan panjang interval menggunakan rumus (3) sebesar 0,499. Banyak data (n) dalam penelitian ini sebanyak 300. Dengan 9 kelas interval dan panjang interval 0,499 maka terbentuk himpunan semesta (u) yaitu $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8,$ dan u_9 . Nilai interval-interval semesta (u) dan nilai tengah (m) terlihat dalam Tabel 1.

Tabel 1. Panjang Interval

No	Interval	Nilai tengah (m)
1	$U_1 = [0,54 ; 1,04]$	0,79
2	$U_2 = [1,04 ; 1,54]$	1,29
3	$U_3 = [1,54 ; 2,04]$	1,79
4	$U_4 = [2,04 ; 2,54]$	2,29
5	$U_5 = [2,54 ; 3,04]$	2,79
6	$U_6 = [3,04 ; 3,54]$	3,39
7	$U_7 = [3,54 ; 4,04]$	3,79
8	$U_8 = [4,04 ; 4,54]$	4,29
9	$U_9 = [4,54 ; 5,04]$	4,79

3. Pembentukan himpunan fuzzy. Proses fuzzifikasi mengubah data numerik menjadi data linguistik berdasarkan interval yang telah diperoleh, dibentuk sesuai rumus (5). Himpunan semesta u_1, u_2, \dots, u_9 , diasumsikan menjadi A_1, A_2, \dots, A_9 menjadi kumpulan fuzzy dari variabel linguistik. Nilai keanggotaan himpunan fuzzy A_i berada diantara 1, 0.5, 1 dengan $1 \leq i \leq 9$, 9 adalah jumlah interval. Dengan demikian terbentuk definisi dari setiap fuzzy set A_i seperti terlihat pada matriks berikut. Berdasarkan definisi dari himpunan fuzzy A_i tersebut diketahui pada A_1 didefinisikan derajat keanggotaan u_1 terhadap A_1 bernilai 1, derajat keanggotaan u_2 terhadap A_1 bernilai 0.5, serta $u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9$ terhadap A_1 bernilai 0. Demikian juga derajat keanggotaan $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8$ dan u_9 terhadap A_2 hingga A_9 . Selanjutnya difuzzifikasikan berdasarkan interval yang diperoleh (Tabel 2), dan ditentukan nilai linguistik sesuai jumlah interval yang terbentuk. Berdasarkan tabel 2 bisa diambil contoh pada jam 16:36:48 didapatkan kecepatan angin sebesar 2,3 m/s data tersebut masuk dalam derajat keanggotaan nilai linguistik A_4 , dengan interval $[2,04 ; 2,54]$.

Tabel 2. Fuzzifikasi

Waktu	Tegangan (Volt)	Kec. Angin (m/s)	Fuzifikasi
16:16:22	4.86	5.04	A9



16:16:26	4.20	4.40	A8
16:16:30	3.37	3.59	A7
16:16:34	3.13	3.36	A6
16:16:38	2.88	3.12	A6
16:16:42	2.49	2.74	A5
16:16:46	2.34	2.60	A5
16:16:51	2.10	2.36	A4
16:16:55	1.78	2.05	A4
...
16:36:36	1.39	1.68	A3
16:36:40	1.15	1.44	A2
16:36:44	1.39	1.68	A3
16:36:48	2.03	2.30	A4

4. *Fuzzy Logic Relationship (FLR) dan Fuzzy Logic Relationship Group (FLRG).*

FLR diidentifikasi berdasarkan data historis yang telah difuzzifikasikan pada tahap sebelumnya. FLR ditulis $A_i \rightarrow A_j$, A_i adalah himpunan sisi kiri atau pengamatan sebelumnya yaitu $F_{(t-1)}$ dan A_j adalah himpunan sisi kanan atau pengamatan saat ini yaitu $F(t)$ pada data *time series*. Tabel 3 menampilkan FLR yang terbentuk.

Tabel 3. *Fuzzy Logic Relationship (FLR)*

Waktu	V. Gen. (volt)	Kec. Angin (m/s)	Fuzifikasi	FLR
16:16:18	3.88	4.09	A8	N/A
16:16:22	4.86	5.04	A9	A8→A9
16:16:26	4.20	4.40	A8	A9→A8
16:16:30	3.37	3.59	A7	A8→A7
16:16:34	3.13	3.36	A6	A7→A6
16:16:38	2.88	3.12	A6	A6→A6
16:16:42	2.49	2.74	A5	A6→A5
16:16:46	2.34	2.60	A5	A5→A5
16:16:51	2.10	2.36	A4	A5→A4
16:16:55	1.78	2.05	A4	A4→A4
16:16:59	1.46	1.74	A3	A4→A3
...
16:36:36	1.39	1.68	A3	A3→A3
16:36:40	1.15	1.44	A2	A3→A2
16:36:44	1.39	1.68	A3	A2→A3
16:36:48	2.03	2.30	A4	A3→A4

Pembentukan FLR menggunakan orde 1, sehingga pada awal data tidak ada nilai FLR. Selanjutnya membentuk FLRG berdasarkan hasil FLR dengan cara mengelompokkan setiap FLR yang memiliki sisi kiri atau $F(t-1)$ yang sama kemudian digabungkan kedalam grup yang sesuai. Hasil FLRG terlihat pada Tabel 4. Pembentukan FLRG ini untuk menghitung peramalan berdasarkan data awal yang digunakan sebagai acuan. Dengan demikian dapat dikatakan jika fuzzy set yang masuk grup 2 dapat meramalkan dengan lebih dari satu set yaitu A1, A2, A3, A4, dan A5.

Tabel 4. *Fuzzy Logic Relantions Group (FLRG)*



Grup	FLRG
Grup 1	A1→A1, A1→A2, A1→A3, A1→A4
Grup 2	A2→A1, A2→A2, A2→A3, A2→A4, A2→A5
Grup 3	A3 → A1, A3 → A2, A3 → A3, A3 → A4, A3 → A5,
Grup 4	A4→A2, A4→A3, A4→A4, A4→A5, A4→A6
Grup 5	A5→A4, A5→A5, A5→A6, A5→A7
Grup 6	A6→A4, A6→A5, A6→A6, A6→A7, A6→A8
Grup 7	A7→A6, A7→A7, A7→A8
Grup 8	A8→A6, A8→A7, A8→A8
Grup 9	A9→A7, A9→A8, A9→A9

5. Defuzzifikasi Chen

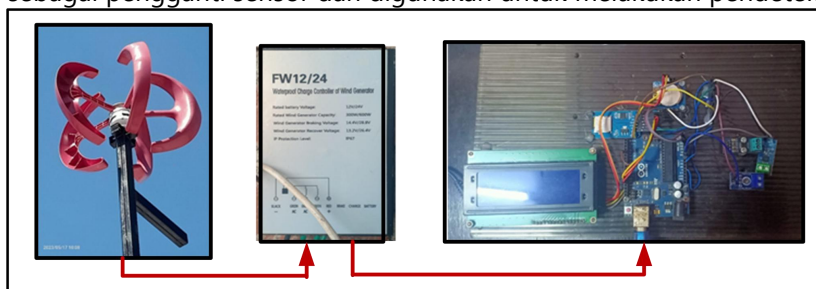
Proses defuzzifikasi menggunakan nilai tengah dari masing-masing grup *fuzzy*. Perhitungan peramalan menggunakan *fuzzy time series* Chen dengan cara, misalkan pada grup 1 mengandung FLRG A1, A2, A3, dan A4 maka nilai peramalan grup 1 adalah rata-rata nilai tengah dari A1, A2, A3, dan A4.

Tabel 5. Defuzzifikasi *Fuzzy Time Series* Chen

Grup	FLRG	Perhitungan F(t)	Peramalan
1	A1→A1, A1→A2, A1→A3, A1→A4	$(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)/4$	1,541
2	A2→A1, A2→A2, A2→A3, A2→A4, A2→A5	$(m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)/5$	1,791
3	A3→A2, A3→A3, A3→A4, A3→A5, A3→A6	$(m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6)/5$	2,290
4	A4→A2, A4→A3, A4→A4, A4→A5, A4→A6	$(m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6)/5$	2,290
5	A5→A4, A5→A5, A5→A6, A5→A7	$(m_4 + m_5 + m_6 + m_7)/4$	3,039
6	A6→A4, A6→A5, A6→A6, A6→A7, A6→A8	$(m_4 + m_5 + m_6 + m_7 + m_8)/5$	3,289
7	A7→A6, A7→A7, A7→A8, A7→A9	$(m_6 + m_7 + m_8 + m_9)/4$	4,038
8	A8→A6, A8→A7, A8→A8	$(m_6 + m_7 + m_8)/3$	3,788
9	A9→A7, A9→A8, A9→A9	$(m_7 + m_8 + m_9)/3$	4,287

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode *Fuzzy Time Series* untuk mendeteksi kecepatan angin harian yang dapat menghasilkan energi listrik diimplementasikan untuk sistem VAWT 800 Watt tanpa sensor kecepatan dengan klasifikasi *Fuzzy time series* model Chen terlihat pada Gambar 5, terdiri dari tiga bagian yaitu turbin angin sumbu vertikal, generator dan sistem pengendali yang terbentuk dari mikrokontroler dimana pada perangkat lunaknya terdapat *fuzzy time series* model Chen yang difungsikan sebagai pengganti sensor dan digunakan untuk melakukan pendeteksian kecepatan angin.



Gambar 5. Diagram Blok Sistem

Instalasi sistem turbin angin terintegrasi berada pada 562 mdpl dengan ketinggian bilah 10 meter dari permukaan tanah. Energi kinetik dari pergerakan angin menabrak bilah turbin angin sehingga berputar dan porosnya berotasi yang kemudian menggerakkan generator dan akhirnya menghasilkan arus listrik bolak balik 3



phasa. Arus listrik ini disearahkan oleh *rectifier* 3 phasa sehingga menjadi gelombang arus searah. Tegangan DC dideteksi oleh modul sensor tegangan dan masuk ke analog input mikrokontroler. Tegangan tersebut disimpan di kartu memori (*MMC card*) beserta waktu deteksinya (dari RTC). Berdasarkan data tegangan yang tersimpan di kartu memori diambil sebagai data awal dalam pengolahan prediksi kecepatan angin menggunakan *Fuzzy time series Chen*.

Pengamatan terhadap kecepatan angin harian dilakukan selama trimester kedua dalam satu tahun dengan waktu cuplik tiap 5 detik. Karena data yang sangat banyak dan tidak semuanya mempunyai kecepatan angin yang bervariasi maka ditentukan data yang dipakai dalam penelitian ini adalah pada hari dengan kecepatan angina terendah jam 16.16 WIB sampai dengan 16.36 WIB (300 data). Pengujian perubahan kecepatan angin berdasarkan perubahan tegangan generator dengan mendeteksi kecepatan angin model *sensorless* menggunakan pendekatan perubahan tegangan yang dihasilkan oleh PMSG. Tegangan yang dihasilkan dimasukkan ke analog input mikrokontroler dan di simpan di kartu memori. Kalibrasi kecepatan angin menggunakan anemometer. Data pengujian terlihat dalam Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Hasil Deteksi Angin Sistem vs Kalibrator

No	Sistem		Benetech	Error
	Tegangan (V)	Kec. Angin (m/s)	Kec. Angin	
1	0.50	0.90	0.9	0.00%
2	0.71	1.02	1.1	7.27%
3	1.05	1.35	1.4	3.57%
4	1.29	1.58	1.5	5.33%
5	1.44	1.72	1.7	1.18%
7	1.66	1.94	1.9	2.11%
8	1.83	2.10	2.2	4.55%
9	2.00	2.27	2.3	1.30%
10	2.44	2.69	2.6	3.46%
11	2.56	2.81	2.8	0.36%
12	3.03	3.26	3.3	1.21%
13	3.22	3.45	3.5	1.43%
14	3.69	3.90	4.0	2.50%
15	3.86	4.07	4.1	0.73%
16	4.00	4.20	4.2	0.09%
17	4.20	4.40	4.4	0.06%
18	4.79	4.97	5.0	0.60%
Rata-Rata Error				2.10%

Terlihat konversi tegangan yang dihasilkan oleh PMSG terhadap perubahan kecepatan angin mempunyai eror rata-rata 2,10%. Artinya PMSG yang digunakan dapat melakukan konversi energi pergerakan angin menjadi besaran listrik dengan sangat baik sesuai spesifikasi. Pengujian prediksi kecepatan angin dengan algoritma *fuzzy time series Chen* memberikan hasil seperti terlihat dalam Tabel 7, diperoleh MAPE sebesar 32,68%. Nilai MAPE besar tersebut terjadi karena fluktuasi kecepatan angin yang besar. Secara grafik yang dihasilkan seperti terlihat pada Gambar 6, prediksi kecepatan angin menggunakan algoritma *fuzzy time series Chen* dapat mengikuti grafik perubahan kecepatan angin secara aktual.

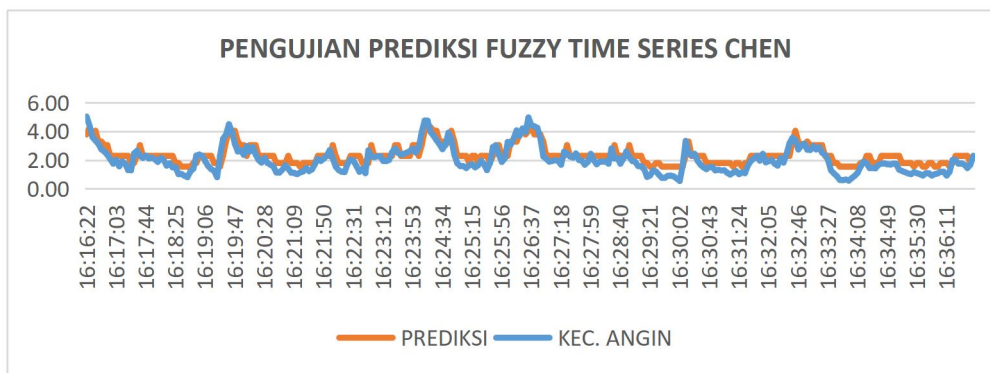
Sistem VAWT tanpa sensor kecepatan dengan klasifikasi menggunakan *Fuzzy time series Chen* ini, membutuhkan waktu cukup lama pada proses pengambilan dan pengamatan data kecepatan angin (sekitar tiga bulan), karena sesuai data *traffic* (pergerakan) angin area Malang bahwa pada bulan Februari hingga Juni



pergerakan angin berada pada kondisi terendah sehingga perlu mengumpulkan banyak data kondisi angin untuk dapat diolah menggunakan algoritma yang sudah dituju. Dilanjutkan dengan proses pengujian dan analisis kinerja sistem secara keseluruhan.

Tabel 7. Peramalan Seluruh Data Dengan Fuzzy Time Series Chen

Waktu	Kec. Angin	Hasil prediksi	Error (%)
16:16:18	4.09	N/A	N/A
16:16:22	5.04	3.79	24.78
16:16:26	4.40	4.29	2.50
16:16:30	3.59	3.79	5.42
16:16:34	3.36	4.04	20.14
16:16:38	3.12	3.29	5.45
16:16:42	2.74	3.29	19.98
16:16:46	2.60	3.04	17.08
16:16:51	2.36	3.04	28.59
16:16:55	2.05	2.29	11.53
16:16:59	1.74	2.29	31.35
16:17:03	2.01	2.29	14.22
...
16:36:36	1.68	2.29	36.67
16:36:40	1.44	2.29	58.67
16:36:44	1.68	1.79	6.87
16:36:48	2.30	2.29	0.23
Mean Absolute Percentage Error (MAPE)			32.68



Gambar 6. Grafik Perbandingan Data Aktual Kecepatan Angin Vs Prediksi

4. KESIMPULAN

Penelitian yang telah dilakukan dapat menjadi solusi atas permasalahan bahwa teridentifikasi algoritma *fuzzy time series Chen* dapat digunakan untuk melakukan prediksi kecepatan angin untuk menghasilkan tegangan listrik pada sistem *Vertical-Axis Wind Turbine* 800 Watt. Dengan menggunakan algoritma tersebut sistem dapat beroperasi dengan mode *sensor-less* namun tetap dapat mengukur kecepatan angin dengan akurasi hingga 70%.

Beberapa saran yang perlu diperhatikan antara lain penelitian masih perlu diteruskan dengan peningkatan orde time series untuk mendapatkan error yang lebih kecil, dan perlu menggunakan algoritma time series jenis lain untuk mendapatkan perbandingan error dan akurasi terhadap hasil prediksi.



5. UCAPAN TERIMA KASIH (Jika Ada)

Disampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Islam Malang (UNISMA) atas dukungan dana yang diberikan melalui Hibah Institusi Universitas Islam Malang (HI-Ma) sehingga penelitian ini dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik Indonesia. (2018). *Statistical Yearbook of Indonesia 2018*.
- [2] Kementerian ESDM. (2018). *Inilah Konsumsi Listrik Nasional*.
- [3] Rahmat, M. H. (2018). *Potensi Pengembangan PLTB di Indonesia*.
- [4] Yurtsven, Kaan., Karatepe, Engin., & Deniz, E. (2021). Sensorless fault detection method for photovoltaic systems through mapping the inherent characteristics of PV plant site: Simple and practical. *Solar Energy*, 216, 96–110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.011>
- [5] Hata, Katsuhiro., Hanajiri, Kensuke., Imura, Takehiro., Hori, Yoichi., Sato, Motoki., & Gunji, D. (2018). Driving Test Evaluation of Sensorless Vehicle Detection Method for In-motion Wireless Power Transfer. *International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata -ECCE Asia)*, 663–668. <https://doi.org/https://doi.org/10.23919/IPEC.2018.8508025>
- [6] Wang, Qiong., Wang, Shuanghong., & Chen, C. (2019). Review of sensorless control techniques for PMSM drives. *IEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/tee.22974>
- [7] Yao, Yihui., Shen, Yichao., Lu, Yan., & Zhuang, C. (2020). Sensorless Collision Detection Method for Robots with Uncertain Dynamics Based on Fuzzy Logics. *2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 413–418. <https://doi.org/10.1109/ICMA49215.2020.9233749>
- [8] Sreeram, K. (2018). Design of Fuzzy Logic Controller for Speed Control of Sensorless BLDC Motor Drive. *2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICPCCT)*, 18–24. <https://doi.org/10.1109/ICPCCT.2018.8574280>
- [9] Wagner, H.-J. (2020). Introduction to wind energy systems. *EPJ Web of Conferences*, 00004. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/epjconf/202024600004>
- [10] Twidell, J. (2022). *Renewable Energy Resources* (4th ed.).
- [11] Nelson, V., & Starcher, K. (2018). *Wind energy: renewable energy and the environment* (3rd ed.). CRC press.
- [12] Eriksson, Sandra., Bernhoff, Hans., & Leijon, M. (2008). Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1419–1434. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.017>
- [13] Al-Bahadly, I. (2009). Building a wind turbine for rural home. *Energy for Sustainable Development*, 13(3), 159–165. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2009.06.005>
- [14] Kim, Y., Kang, M., Muljadi, E., Park, J. W., & Kang, Y. C. (2017). Power Smoothing of a Variable-Speed Wind Turbine Generator in Association With the Rotor-Speed-Dependent Gain. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(3), 990–999. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2637907>
- [15] Schaffarczyk, A. P. (2020). Introduction to Wind Turbine Aerodynamics. In *Green Energy and Technology book series* (pp. 7–25)
- [16] Dilimulati, Aierken., Stathopoulos, Ted., & Paraschivoiu, M. (2018). Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175, 179–192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.01.003>
- [17] Abo-Khalil, A. G., Eltamaly, A. M., RP, P., Alghamdi, A. S., & Tlili, I. (2020). A Sensorless Wind Speed and Rotor Position Control of PMSG in Wind Power Generation Systems. *Sustainability*, 12(20), 8481. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su12208481>
- [18] Shotorbani, A. M., Mohammadi-Ivatloo, B., Wang, Liwei., Marzband, Mousa., & Sabahi, M. (2019). Application of finite-time control Lyapunov function in low-power PMSG wind energy conversion systems for sensorless MPPT. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 106, 169–182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.09.039>
- [19] Du, Wenjuan., Wang, Xubin., & Wang, H. (2018). Sub-synchronous interactions caused by the PLL in the grid-connected PMSG for the wind power generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 98, 331–341. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.11.018>
- [20] Chatri, Chakib., & Ouassaid, M. (2021). *Chapter 11 - Advanced control of PMSG-based wind energy conversion system applying linear matrix inequality approach* (N. A. K. Ahmad Taher Azar (ed.)). Renewable Energy Systems, Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820004-9.00002-4>
- [21] Song, Q., & Chissom, B. S. (1993). *Forecasting enrollments with fuzzy time series—part I*. *Fuzzy sets and systems*, 54(1).
- [22] Wei, W. W. S. (2019). *Multivariate Time Series Analysis and Applications*. John Wiley & Sons.
- [23] Chen, S. M. (1996). *Forecasting enrollments based on fuzzy time series*. *Fuzzy Sets Syst.* 81.
- [24] Arnita, Afisah, N., & Marpaung, F. (2019). A Comparison of The Fuzzy Time Series Methods of Chen, Cheng and Markov Chain in Predicting Rainfall in Medan. *Journal of Physics: Conference Series, Volume 1462, The 6th Annual International Seminar on Trends in Science and Science, Conf. Ser. 1462 012044 Education*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1462/1/012044>



- [25] Bose, Mahua., & Mali, K. (2019). Designing fuzzy time series forecasting models: A survey. *International Journal of Approximate Reasoning, Volume 111*, 78–99.
- [26] Severiano, C. A., Silva, P. C. L., Sadaei, H. J., & Guimarães, F. G. (2017). Very short-term solar forecasting using fuzzy time series. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2017.8015732>

