

Implementasi Kalman Filter dan Logika Fuzzy untuk Kontrol Adaptif Kecepatan Kipas Berdasarkan Suhu

Implementation of Kalman Filter and Fuzzy Logic for Adaptive Control of Fan Speed Based on Temperature

Kholisa Muthi Maslahati¹, Isna Bagus Purnawan², Muhammad Irfan Aprianto³, Ahmad Taufiq Musaddid⁴

^{1,2,3,4}Program Studi D4 Teknik Elektronika, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Yogyakarta

^{1,2,3,4}Kampus Vokasi II UNY Gunungkidul, Semanu 55893, Indonesia

email: ¹kholisamuthi.2023@student.uny.ac.id, ²isnabagus.2023@student.uny.ac.id,

³muhammadirfan.2023@student.uny.ac.id, ⁴ahmadtaufiqmusaddid@uny.ac.id

Informasi Artikel

Dikirim, 28 Juni 2025
Diterima, 16 Desember 2025
Diterbitkan, 19 Desember 2025

Kata Kunci :

Kalman Filter, Logika Fuzzy, LM35, Motor Kipas

Keyword :

Kalman Filter, Fuzzy Logic, LM35, Fan Motor

ABSTRAK

Sistem kontrol suhu ruangan dengan memanfaatkan energi secara adaptif terhadap perubahan suhu ruangan merupakan sesuatu yang penting untuk kenyamanan aktivitas manusia. Namun, ketidakakuratan pembacaan sensor oleh derau sinyal akan menurunkan akurasi sistem kontrol. Tujuan penelitian ini tidak lain untuk mengembangkan sistem kontrol suhu ruangan berbasis Kalman Filter sebagai stabilitas pembacaan sensor dan pengambilan keputusan dengan Metode Tsukamoto dalam logika fuzzy. Pada eksperimen ini digunakan sensor LM35 untuk mengukur suhu dalam dan luar ruangan, arduino nano sebagai kontroler digunakan untuk memroses data, dan motor DC JGA sebagai aktuator sistem. Hasil eksperimen menunjukkan kecepatan kipas dapat bekerja secara responsif dengan integrasi Kalman Filter dan logika fuzzy. Walaupun demikian, evaluasi kinerja kalman filter mengindikasikan bahwa penentuan parameter (Q dan R) yang digunakan sangat berdampak pada tingkat kemampuan dalam mereduksi sinyal derau dari lingkungan sekitarnya.

ABSTRACT

A room temperature control system that utilizes energy adaptively to changes in room temperature is important for human comfort. However, inaccuracies in sensor measurement due to signal noise will reduce the accuracy of the control system. This study aims to develop a room temperature control system based on the Kalman Filter for sensor measurement stability and decision making using the Tsukamoto Method in fuzzy logic. In this experiment, an LM35 sensor was used to measure indoor and outdoor temperatures, an Arduino Nano was used as a controller to process data, and a JGA DC motor was used as the system actuator. The experimental results show that the fan speed can work responsively with the integration of the Kalman Filter and fuzzy logic. However, the evaluation of the Kalman filter performance indicates that the determination of the parameters (Q and R) used greatly affects the ability to reduce signal noise from the surrounding environment.

1. PENDAHULUAN

Kenyamanan termal merupakan salah satu faktor yang memengaruhi kualitas hidup dan kondisi kenyamanan penghuni yang sebagian besar berada di dalam ruangan [1]. Oleh karena itu, perlunya sistem pendingin yang reponsif, khususnya pada wilayah beriklim tropis seperti di Indonesia. Sebagai solusi, kipas angin konvensional sering menjadi pilihan karena penggunaan yang hemat energi dan ramah lingkungan dibanding sistem pendingin udara berkompresor. Selain itu, penggunaan kipas jenis ini juga mengakibatkan pemborosan energi karena ketidakmampuannya menyesuaikan kecepatan otomatis dengan kondisi lingkungan yang ada.

Data yang paling penting dalam sistem kontrol pendingin tidak lain adalah pengukuran suhu, di dalam ataupun di luar ruangan. Penggunaan sensor LM35 memiliki kemudahan implementasi dan banyak digunakan untuk kipas angin otomatis. Meski demikian, data yang dihasilkan cenderung kurang stabil karena masih tercampur derau akibat dari perubahan kecil pada lingkungan, fluktuasi catu daya, bahkan interferensi elektromagnetik. Penggunaan filter terhadap derau sangat penting karena tanpa filter, data hasil dari sensor tidak stabil dan fluktuatif. Hasil pendeteksian sensor LM35 pada jarak $\leq 2,5$ m akurat, saat jarak sensor 3 m pembacaan suhu kurang akurat, dan pada jarak 3,5 m sensor mendeteksi suhu dengan pembacaan hasil tidak beraturan (loncat) [2]. Adapun di penelitian lain menggunakan Kalman Filter dan logika fuzzy pada motor servo menunjukkan akurasi yang tinggi dibanding tanpa menggunakan Kalman Filter. Penelitian tersebut berhasil mencapai kondisi *steadystate* sebesar 0,1% hingga 0,45% dan *overshoot* $< 2\%$ [3]. Pengaplikasian Kalman Filter diharapkan mampu membaca suhu dengan lebih presisi untuk dasar pengambilan keputusan. Selanjutnya, pengambilan keputusan dinamis oleh logika fuzzy dengan kemampuan menangani informasi yang ambigu dan pengambilan keputusan berbasis aturan. Penggunaan logika fuzzy diharapkan mampu memberikan kontrol yang cangih terhadap pengaturan kecepatan kipas. Kombinasi penyaringan derau dan pengambilan keputusan untuk sistem kendali kipas berdasarkan suhu luar ataupun dalam ruangan masih perlu dieksplorasi lebih lanjut.

Berdasarkan permasalahan yang dijelaskan juga gap penelitian, tujuan penulisan jurnal ini untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali kipas angin otomatis dengan cerdas. Sistem ini diharapkan mampu menyaring derau yang dihasilkan oleh sensor LM35 secara real-time menggunakan Kalman Filter dan pengoptimalan pengambilan keputusan kecepatan kipas angin melalui logika fuzzy. Penelitian ini berbeda dari yang lain karena penjelasan mengenai karakteristik derau memengaruhi hasil Kalman Filter dan penggunaan logika fuzzy sebagai metode pengambilan keputusan untuk aplikasi kontrol kipas angin.

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, metode yang digunakan yaitu eksperimental dengan membuat prototipe. Rincian penggunaan komponen elektronika, metode penyaringan sinyal, dan algoritma pengambilan keputusan dijelaskan dalam sub-bagian berikut.

2.1. Arduino Nano

Mikrokontroler merupakan otak dari sistem, digunakan sebagai unit pemroses utama yang mengintegrasikan data sensor, menjalankan algoritma filtering dan kontrol, serta menghasilkan sinyal kendali untuk aktuator. Pada penelitian ini, alasan digunakannya Arduino Nano [4] karena ukurannya yang kecil dan ringkas, adanya pin *input/output* yang mencukupi, serta kemudahan dalam pemrograman menggunakan Arduino IDE. Arduino Nano bertanggung jawab untuk mengolah data suhu yang diterima dari sensor LM35, mulai dari penyaringan derau menggunakan Kalman Filter, eksekusi logika fuzzy untuk pengambilan keputusan kecepatan kipas, dan pengiriman sinyal PWM ke driver motor. Detail spesifikasi Arduino Nano disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Mikrokontroler Arduino Nano

Parameter	Spesifikasi
Model	ATmega328
Tegangan Operasi	5 V
Tegangan <i>Input</i>	7-15 V
Pin I/O Digital	20 (6 pin PWM)
Pin I/O Analog	8
Arus DC per Pin I/O	20 mA
Memori Flash	32 KB (ATmega328) 2 KB (bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Kecepatan Clock	16 MHz
Komunikasi Antarmuka Port	USART, SPI mini-USB

2.2. LM35

Sensor suhu merupakan elemen paling penting dari sistem ini, sebagai *input* utama sistem. Pendeteksian dan pengukuran suhu lingkungan diaplikasikan menggunakan LM35 [5]. Sensor ini bekerja secara *real-time*, dengan akurasi yang tinggi, dan linearitas *output* tegangan terhadap suhu. LM35 dipilih untuk memantau suhu di dalam maupun luar ruangan. Spesifikasi dari LM35 disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Sensor Suhu

Parameter	Spesifikasi
Model	LM35
Type	Presisi Celcius
Rentang Suhu Ukur	-55°C hingga +150°C
Akurasi	±0.5°C pada 25°C
Tegangan Operasi	4 V hingga 30 V
Arus Konsumsi	< 60 µA
Output Tegangan	10 mV/°C

Output yang dihasilkan dari pembacaan sensor suhu LM35 merupakan sinyal analog, dibutuhkan konversi dari hasil sinyal analog agar sinyal dapat diproses. Konfigurasi Arduino Nano dengan representasi bit yang dapat dibaca sebesar 1023 dan tegangan referensi yang dipakai 5 V. Konversi sinyal analog akan mengubah nilai ADC terbaca menjadi tegangan. Nilai suhu yang terukur dapat dihasilkan dari nilai tegangan dengan rumus masing-masing konversi sebagai berikut.

$$Tegangan (V) = \frac{ADC\ terbaca}{Resolusi\ ADC} \times Tegangan\ Referensi (V) \quad (1)$$

$$Suhu (°C) = \frac{Tegangan (V)}{0,01\ V/°C} \quad (2)$$

2.3. Motor JGA25-370

Motor kipas angin yang digunakan pada eksperimen ini adalah Motor *Geared* DC model JGA25-370 [6]. Dengan operasi tegangan yang digunakan yaitu 12 V, motor ini digunakan karena kemampuannya untuk memberikan torsi yang memadai pada kecepatan yang rendah, dengan spesifikasi lebih lanjut ditulis pada Tabel 3. Motor kipas ini disambungkan dengan dengan Driver BTN 7960 agar pengiriman sinyal PWM dari kontroler dapat terealisasi.

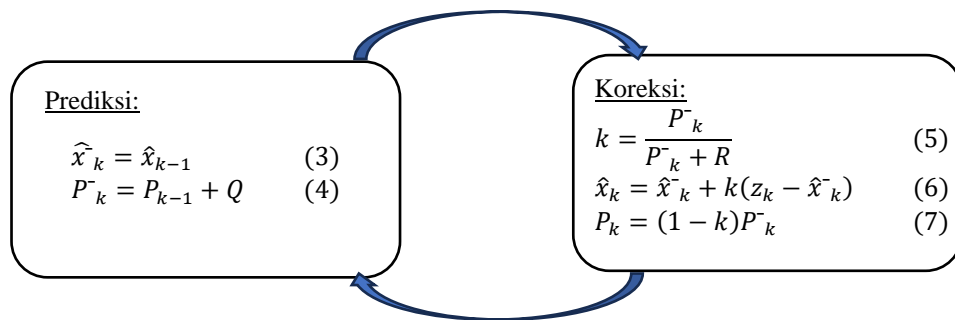
Tabel 3. Spesifikasi Motor DC

Parameter	Spesifikasi
Tanpa Beban	
Kecepatan Rotasi	350RPM
Arus Listrik	0,1 A
Titik Efisiensi Maksimum	
Kecepatan Rotasi	245RPM
Arus Listrik	0,65 A
Torsi	1,4 Kg.cm
Daya	2,4 W
Blockage	
Torsi	5,2 Kg.cm
Arus Listrik	2,2 A

2.4. Kalman Filter

Kalman Filter diperkenalkan oleh Rudolf E. Kalman pada Tahun 1960. Teori ini banyak digunakan karena filter ini dapat beradaptasi, tidak hanya sebatas solusi dari permasalahan yang ada, dan memiliki karakteristik yang rekursif, yaitu bisa digunakan secara *real-time*. Teori yang awalnya hanya dibuat untuk sistem linear, sekarang sudah banyak dikembangkan untuk solusi nonlinear juga. Algoritma Kalman Filter memerlukan dua persamaan: estimasi keadaan menggunakan dinamikanya sendiri (tahap prediksi) dan perbaikan dari estimasi pertama menggunakan informasi dari variabel yang diamati (tahap koreksi) [7].

Pada praktik ini digunakan model *state-space* Kalman Filter linier dengan metode Kalman Filter Diskrit (*Discrete Kalman Filter*) berdasarkan hasil pengukuran pada hasil sensor LM35 yang dilakukan dengan jarak waktu antar sampel pengukuran konstan yaitu 300 ms. Perhitungan Kalman Filter Diskrit memiliki dua tahapan, yaitu tahap prediksi dan tahap *update*/koreksi. Pada tahap prediksi perhitungan dibagi menjadi dua perhitungan, yaitu perhitungan prediksi keadaan (\hat{x}_k) dan perhitungan prediksi kovarian error (P_k^-). Tiga perhitungan dilanjutkan pada tahap koreksi meliputi perhitungan Kalman Gain (k), *update* estimasi keadaan (\hat{x}_k), dan terakhir perhitungan *update* kovarian eror (P_k). Secara matematis metode Kalman Filter Diskrit yang disederhanakan sesuai keperluan dituliskan dalam bentuk berikut.



Variabel \hat{x}_k merupakan *state vector* atau variabel keadaan pada waktu ke-k, P_k^- adalah prediksi kovarian eror sebelum *update* dalam eksperimen ini kami menggunakan nilai 1, dan Q_k adalah kovarian derau proses dengan nilai 0.001.

k pada tahap koreksi merupakan perhitungan Kalman Gain yang mengoperasikan R_k sebagai varian derau pengukuran dari sensor LM35 sebesar 0,25 didapat dari pengkuadratan ketidakpastian sensor LM35 sebesar 0,5°C pada suhu 25°C [5]. Perhitungan *update* estimasi keadaan menggunakan variabel z_k untuk mempresentasikan data sensor aktual/sebenarnya yang diukur oleh sensor.

Dasar pemilihan nilai parameter Q yang digunakan merupakan hasil *trial-and-error*. Inisialisasi dipilihnya nilai P = 1 karena nilai ini bisa menyesuaikan dengan sendirinya, nilai ini akan terbaharui pada tahapan selanjutnya [8].

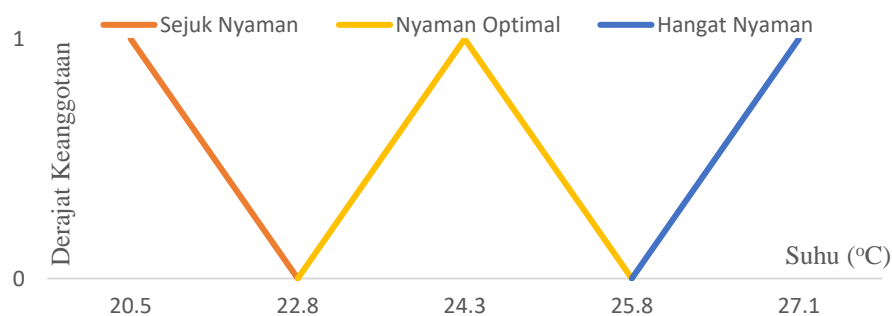
2.5. Logika Fuzzy

Fuzzy diartikan sebagai samar, tidak jelas, atau kabur. Logika fuzzy didasarkan pada logika *boolean* 1 dan 0, logika ini dikembangkan untuk menjawab logika antara nilai kebenaran benar dan salah. Variabel linguistik dalam logika fuzzy yang merupakan hasil ketidakpastian subjektif memungkinkan suatu elemen untuk sebagian termasuk dalam suatu himpunan melalui derajat keanggotaannya [9], contoh ungkapan "sangat lambat", "sangat cepat", "agak lambat", "agak cepat", merupakan nilai diantara "cepat" dan "lambat" dengan perbedaan intensitas derajat keanggotaan. Lotfi Asker Zadeh sebagai "Bapak Logika Fuzzy" memperkenalkan dan mengembangkan Logika Fuzzy pada tahun 1965 melalui jurnal "Fuzzy set". Jurnal tersebut diperkenalkan konsep derajat kebenaran atau derajat keanggotaan untuk mengelola ketidakpastiaan dan ketidaktepatan dalam informasi.

Logika Fuzzy memiliki beberapa tahapan untuk mendapatkan nilai hasil pengolahan. Tahap pertama yaitu Fuzzifikasi (penyamaran). Pada tahap ini pengolahan nilai suhu numerik dari hasil Kalman Filter diubah menjadi derajat keanggotaan (*membership degrees*) dari himpunan fuzzy. Himpunan *fuzzy input* dalam ruangan pada eksperimen ini, dibagi menjadi 3 sesuai standar kenyamanan termal oleh SNI [10], yang ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 1 merupakan grafik keanggotaan himpunan dari standar rentang suhu tersebut.

Tabel 4. Himpunan *Fuzzy Input* Rentang Suhu Kenyamanan Ruang

Himpunan Fuzzy Input	a	b	c
Sejuk Nyaman	20,5°C	22,8 °C	-
Nyaman Optimal	22,8 °C	24,3 °C	25,8 °C
Hangat Nyaman	25,8 °C	27,1 °C	-



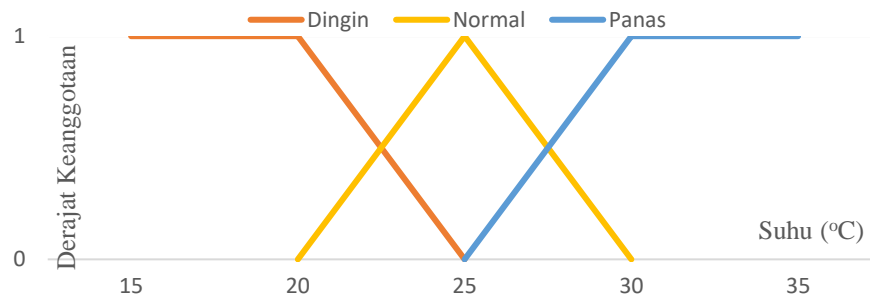
Gambar 1. Fungsi Keanggotaan Himpunan *Fuzzy Input*

Suhu termal di daerah tropis berkisar 15°C-25°C dengan indikasi suhu di Kota Surabaya mencapai 23,2°C -35,3 °C [11]. Pada eksperimen, digunakan rentang suhu diantara 15°C-35°C sebagai himpunan *fuzzy*

input luar ruangan, dengan kategori masing-masing rentang dibagi ke dalam 3 kategori [12] agar pengontrolan kipas angin lebih responsif terhadap berbagai kenyamanan termal, Tabel 5 dan Gambar 2 menunjukkan secara detail kategori tersebut.

Tabel 5. Himpunan Fuzzy Input Rentang Suhu Luar Ruangan

Himpunan Fuzzy Input	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Dingin	15°C	20°C	25°C
Normal	20°C	25°C	30°C
Panas	25°C	30°C	35°C



Gambar 2. Fungsi Keanggotaan Himpunan Fuzzy Input

Nilai derajat keanggotaan didapatkan melalui variabel *a*, *b*, dan *c* yang merupakan batas dari rentang suhu pada setiap fungsi keanggotaan, dan *x* merupakan titik yang dicari nilai derajat keanggotaannya. Berikut disajikan rumus perhitungan derajat keanggotaan.

Suhu Dalam Ruangan

$$\mu_{sejuknyaman} = \begin{cases} 1, & x = a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & x = b \end{cases} \quad (8)$$

Suhu Luar Ruangan

$$\mu_{dingin} = \begin{cases} 1, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x = c \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_{nyaman\ optimal} = \begin{cases} 1, & x = b \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x = a\ \text{atau}\ x = c \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{normal} = \begin{cases} 1, & x = b \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x = a\ \text{atau}\ x = c \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{hangatnyaman} = \begin{cases} 1, & x = b \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & x = a \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_{panas} = \begin{cases} 0, & x = a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b < x < c \end{cases} \quad (13)$$

Inferensi merupakan tahap “otak” dari sistem fuzzy, aturan-aturan fuzzy diterapkan pada derajat keanggotaan yang diperoleh dari tahap sebelumnya. Tahap ini akan menghasilkan crisp parsial (*z*) yang digunakan untuk mengitung PWM pada tahap selanjutnya. Aturan fuzzy (*fuzzy rules*) dibagi menjadi 9 aturan untuk mempresentasikan bagaimana motor kipas harus berperilaku. Operator fuzzy yang dipakai pada tahap ini *IF, AND, THEN*. Tabel 6 menunjukkan aturan fuzzy yang dipakai dalam sistem kontrol kipas.

Tabel 6. Aturan Fuzzy

Suhu Dalam	Suhu Luar	Kecepatan
Sejuk Nyaman	Dingin	Sangat Lambat
Sejuk Nyaman	Normal	Lambat
Sejuk Nyaman	Panas	Cepat
Nyaman Optimal	Dingin	Lambat
Nyaman Optimal	Normal	Cepat
Nyaman Optimal	Panas	Sangat Cepat
Hangat Nyaman	Dingin	Cepat
Hangat Nyaman	Normal	Sangat Cepat
Hangat Nyaman	Panas	Sangat Cepat

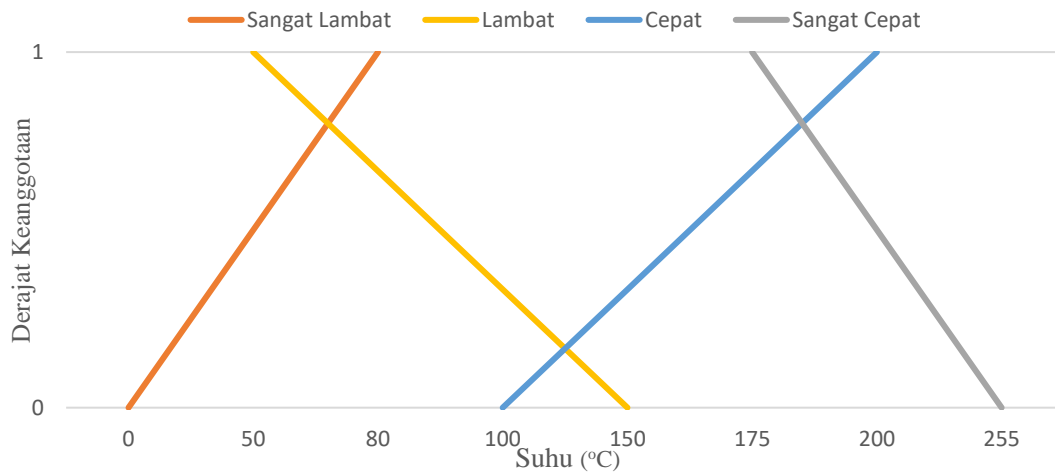
Pada logika ini digunakan metode Tsukamoto karena perbandingan MAPE yang dihasilkan memiliki persentase eror terkecil dibandingkan menggunakan metode Sugeno maupun Mamdani [13]. Metode Tsukamoto membandingkan derajat keanggotaan dari suhu pada aturan-aturan fuzzy dari Tabel 6, kemudian menggunakan nilai minimum untuk mendapatkan derajat aktivasi aturan (*rule firing strength*). Derajat aktivasi aturan (α) ini digunakan untuk mendapat nilai crisp parsial (z) dari fungsi keanggotaan *output*. Setiap aturan-aturan tersebut akan menghasilkan satu nilai z . Berikut ini rumus perhitungan nilai crisp parsial dengan keterangan bahwasanya nilai α merupakan nilai derajat aktivasi dan nilai a dan b batas rentang nilai PWM.

$$z = a + \alpha (b - a) \quad (14)$$

Fungsi keanggotaan pada metode Tsukamoto dirancang berbentuk monoton [14], jadi hasil aturan *IF-THEN* yang dipakai akan langsung menggambarkan hasil akhirnya (*crisp output*) [15]. Rentang Nilai PWM [16] untuk perhitungan nilai z disajikan pada Tabel 7 dan Gambar 3 merupakan grafik fungsi keanggotaan *fuzzy output*.

Tabel 7. Himpunan Fuzzy Output Rentang Nilai PWM

Himpunan Fuzzy Output	a	b
Sangat Lambat	0	80
Lambat	50	150
Cepat	100	200
Sangat Cepat	175	255



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan Fuzzy Output

Tahap terakhir yaitu perhitungan defuzzifikasi (penegasan). Tahap ini menghitung rata-rata berbobot (*weighted average*) [17] dari semua nilai z . *Output* defuzzifikasi bernilai numerik tunggal nilai PWM untuk mengontrol kecepatan kipas dengan rumus.

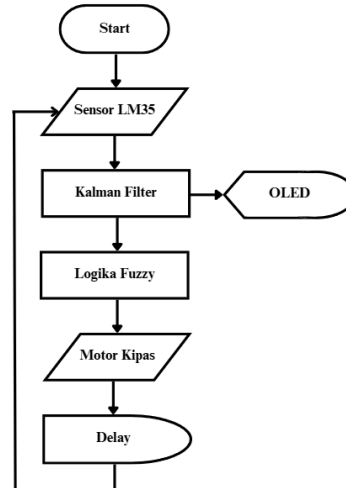
$$PWM = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_i \times z_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_i} \quad (15)$$

2.6. Desain Block Diagram

Perincian komponen tahap *input*, proses, dan *output* dijelaskan dalam diagram ini. *Input* sistem digunakan sebagai masukkan data mikrokontroller, tahap proses akan menangani pemrosesan data, dan *output* sistem berfungsi sebagai aktuator hasil pemrosesan data. Perangkat ini menggunakan dua masukkan sensor suhu LM35 yang setiap sensor tersebut digunakan untuk mengukur suhu ruangan di dalam dan luar ruangan dengan pembacaan dalam derajat celsius (variabel x). Motor kipas dan OLED digunakan untuk mempresentasikan data yang diolah pada Arduino Nano pada tahapan proses. Berikut Gambar 4 yang menunjukkan desain blok diagram.

2.8. Desain Software

Bagian ini menjelaskan perancangan perangkat lunak yang dikembangkan untuk pengimplementasian sistem kontrol kipas otomatis. Perangkat ini bertanggung jawab untuk penerimaan data sensor, pemrosesan data, pengambilan keputusan kontrol, dan aktivasi aktuator. Pengembangan perangkat ini melalui lingkungan integrasi Arduino IDE dan pengimplementasiannya pada mikrokontroler Arduino Nano. Alur kerja sistem digambarkan pada *flowchart* sistem dengan Kalman Filter dan logika fuzzy yang diimplementasikan dalam pengendalian kecepatan motor kipas. Alur sistem secara keseluruhan ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. *Flowchart* Sistem

2.9. Prosedur Pengujian Sistem dan Analisis *Robustness*

Pengujian ini dilakukan dengan dua lingkungan yang berbeda, tidak terkontrol sebagai kondisi nyata dan lingkungan terkontrol. Hasil eksperimen pada ruangan tidak terkontrol digunakan sebagai data baseline guna menjadi titik acuan untuk membandingkan hasil lingkungan terkontrolnya. Pada lingkungan terkontrol digunakan ruangan ber-AC untuk memvariasikan suhu lingkungan pada suhu 18 °C, 24 °C, 26 °C, dan 29 °C. Pengujian ini dilakukan untuk melihat ketahanan (*robustness*) sistem terhadap suhu lingkungan yang berbeda dengan catatan parameter kalman yang ditetapkan dan kondisi target suhu dijaga konstan. Hasil data yang didapatkan dari lingkungan terkontrol akan dipakai sebagai data pengujian ketahanan sistem dan validasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Desain *Hardware*

Bagian ini menjelaskan hasil perancangan perangkat keras sistem. Sistem kontrol kipas angin ini terdiri dari beberapa komponen yang digunakan dan perinciannya sudah ditulis pada bagian sebelumnya, yaitu Metodologi Penelitian. Sensor suhu yang digunakan LM35 merupakan input pendektasian suhu dalam dan luar ruangan. Pembacaan sensor ini menghasilkan sinyal analog yang akan diproses oleh mikrokontroler Arduino Nano sebagai unit pemrosesan utama. Data sensor ini diubah menjadi sinyal digital agar dapat diproses lebih lanjut. Mikrokontroler bertanggung jawab menjalankan algoritma Kalman Filter dan logika fuzzy. Sinyal yang dihasilkan kemudian dikirim ke modul driver BTN7960 sebagai modul antarmuka daya untuk menggerakkan motor DC kipas angin JGA. Motor kipas angin ini juga tersambung dengan baterai agar motor dapat berfungsi. Selain itu, display OLED disediakan untuk menampilkan informasi suhu dan PWM. Diagram blok sistem digambarkan pada Gambar 4, sementara hasil PCB ditampilkan pada Gambar 8 dan hasil fisik prototipe disajikan pada Gambar 9.



Gambar 8. PCB



Gambar 9. Prototipe

3.2. Hasil Rancangan Software

Bagian ini menjelaskan alur sistem hasil implementasi dari komponen-komponen yang digunakan dan pemrosesan pada mikrokontroler, secara umum alur sistem sudah ditampilkan pada Gambar 7. Sistem kontrol kipas angin ini dimulai dengan akuisisi data sinyal analog oleh sensor LM35, kemudian dikonversi menjadi sinyal digital agar dapat diproses. Proses ini dilakukan melalui perhitungan konversi nilai ADC menjadi nilai tegangan dan dilanjutkan konversi menjadi suhu dalam derajat celsius. Hasil perhitungan suhu kemudian diproses oleh Kalman Filter. Dari hasil perhitungan Kalman Filter akan ditampilkan pada OLED bersamaan dengan hasil PWM yang diputuskan oleh logika fuzzy.

3.3. Pengujian Sistem (Kondisi Nyata/Tidak Terkontrol)

Bagian ini menjelaskan bagaimana akuisisi data dari sensor suhu LM35 yang kemudian diolah menjadi PWM dengan proses Kalman Filter dan logika fuzzy. Pendemostrasian akan diambil satu data sampel dari lingkungan tidak terkontrol, pengambilan dua set sampel data sebagai verifikasi penggunaan Kalman Filter dengan pembacaan ADC sebesar 53,5.

3.3.1. Karakteristik Pembacaan Sensor LM35

Bagian ini memaparkan secara detail proses konversi sinyal analog yang diambil dari LM35 menjadi sinyal digital dengan menguraikan langkah-langkah perhitungan pada program Arduino, yaitu memastikan bahwa data sensor yang digunakan sebagai *input* algoritma *filtering* dan kontrol telah diakuisisi dan dikonversi dengan benar. LM35 memiliki *output* tegangan yang linier terhadap suhu, dengan skala 10mV/°C [5]. Mikrokontroler membaca tegangan analog ini lewat pin ADC (*Analog to Digital Converter*) dengan resolusi 10 bit dan tegangan referensi 5V. Untuk satu titik data sampel, perhitungan secara terperinci dijabarkan sebagai berikut.

1. Konversi nilai ADC ke Tegangan

$$\text{Tegangan (V)} = \frac{53,5}{1023} \times 5 = 0,2615 \text{ V} \quad (1)$$

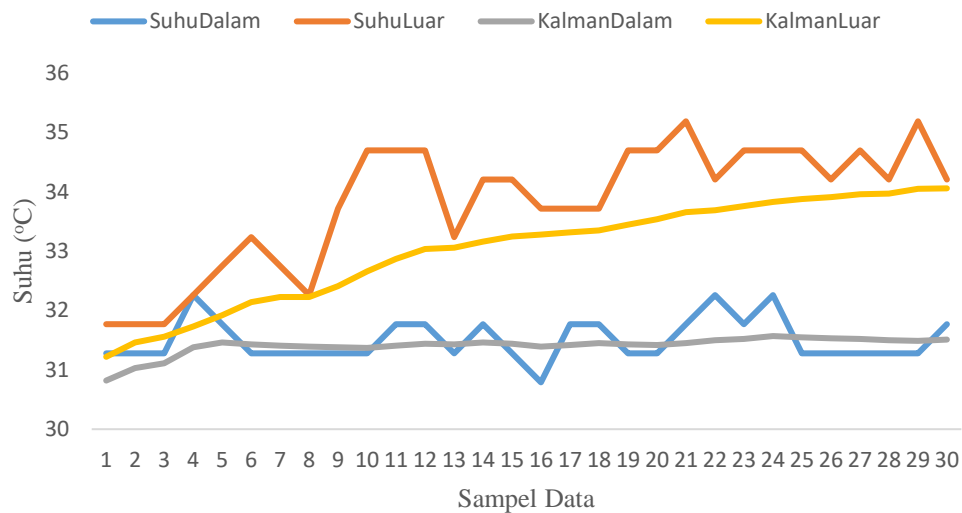
2. Konversi nilai tegangan ke derajat

$$\text{Suhu (}^\circ\text{C)} = \frac{0,2615}{0,01 \text{ V}/^\circ\text{C}} = 26,15 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2)$$

3.3.2. Kinerja Kalman Filter

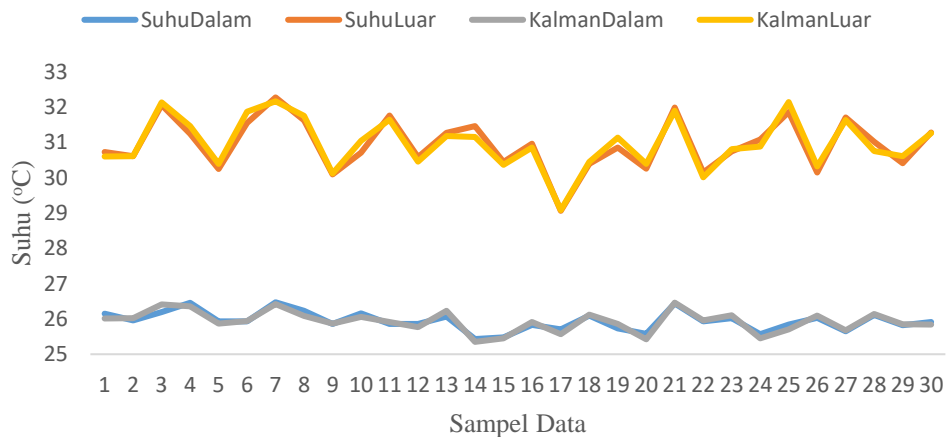
Bagian ini menjelaskan pentingnya filter terhadap derau, bagaimana filter dapat meningkatkan data sensor. Langkah pengambilan sampel dilakukan menggunakan dua set data sampel, masing-masing sebanyak 30 sampel data yang divisualisasikan pada Gambar 10 dan Gambar 11. Verifikasi dan analisis perbedaan kinerja kalman filter antara hasil eksperimen yang sudah dijalankan pada prototipe dengan hasil perhitungan dari kode program yang digunakan saat sistem dijalankan.

Dataset percobaan pertama diuji untuk mengevaluasi bagaimana Kalman Filter dapat mereduksi fluktuasi sinyal asli, dengan tetapan antara suhu dalam dan luar 29°C. Verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil sampel data eksperimen dan hasil perhitungan, secara kuantitatif kedua hasil tersebut menunjukkan kecocokan. Secara visual, menunjukkan bahwa Kalman Filter dapat mereduksi fluktuasi sinyal suhu dan hasil suhu yang telah difilter terlihat lebih stabil dan halus. Ini membuktikan bahwa variabel parameter Q cukup optimal untuk kondisi operasi ini.



Gambar 10. Grafik Sampel Data Pertama

Eksperimen pengambilan data sampel kedua dilakukan beberapa hari setelah pengambilan sampel data pertama, tetapi pada percobaan ini suhu target dalam ruangan sudah diubah menyesuaikan standar kenyamanan termal oleh SNI yaitu 25°C. Hasil pengambilan sampel data menunjukkan hasil yang berbeda dengan pengambilan sampel data pertama. Pada suhu target 25°C Kalman Filter tidak menunjukkan pengurangan fluktuasi sinyal asli secara visual. Dapat disimpulkan bahwa Kalman Filter kurang efektif untuk mengurangi derau karena sinyal suhu yang difilter sangat mirip dengan data suhu mentah.



Gambar 11. Grafik Sampel Data Kedua

Bagian ini juga menguraikan langkah detail dalam perhitungan Kalman Filter yang tercantum pada kode program untuk verifikasi lebih lanjut mengenai hasil perhitungan dan eksperimen, dengan ketentuan estimasi suhu prediksi awal (\hat{x}_k) sesuai pada target suhu dalam yang ditetapkan pada masing-masing dataset. P_k^- atau prediksi kovarian error sebelum update pada sistem bernilai 1, kovarian derau proses (Q_k) bernilai 0.001, dan nilai varian derau pengukuran dari sensor LM35 (R_k) sebesar 0.25. Detail perhitungan iterasi pertama disajikan di bawah ini.

1. Perhitungan Prediksi dan Koreksi Suhu Dataset Pertama

Suhu Dalam Ruangan

- Prediksi

$$\hat{x}_k = 29^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$P_k^- = 1 + 0,001 = 1,001 \quad (4)$$

- Koreksi

$$k = \frac{1,001}{1,001 + 0,25} = 0,8 \quad (5)$$

$$\hat{x}_k = 29 + 0,8(31,28 - 29) = 30,824 \quad (6)$$

$$P_k = (1 - 0,8)1,001 = 0,2002 \quad (7)$$

Suhu Luar Ruangan

- Prediksi

$$\hat{x}_k = 29^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$P_k^- = 1 + 0,001 = 1,001 \quad (4)$$

- Koreksi

$$k = \frac{1,001}{1,001 + 0,25} = 0,8 \quad (5)$$

$$\hat{x}_k = 29 + 0,8(31,77 - 29) = 30,216 \quad (6)$$

$$P_k = (1 - 0,8)1,001 = 0,2002 \quad (7)$$

2. Perhitungan Prediksi dan Koreksi Suhu Dataset Kedua

Suhu Dalam Ruangan

- Prediksi

$$\hat{x}_k = 25^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

$$P_k = 1 + 0,001 = 1,001 \quad (4)$$

- Koreksi

$$k = \frac{1,001}{1,001 + 0,25} = 0,8 \quad (5)$$

$$\hat{x}_k = 25 + 0,8(26,15 - 25) = 25,92 \quad (6)$$

$$P_k = (1 - 0,8)1,001 = 0,2002 \quad (7)$$

Suhu Luar Ruangan

- Prediksi

$$\hat{x}_k = 29^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

$$P_k = 1 + 0,001 = 1,001 \quad (4)$$

- Koreksi

$$k = \frac{1,001}{1,001 + 0,25} = 0,8 \quad (5)$$

$$\hat{x}_k = 29 + 0,8(31,72 - 29) = 30,176 \quad (6)$$

$$P_k = (1 - 0,8)1,001 = 0,2002 \quad (7)$$

Hasil perbandingan antara data eksperimen dengan data perhitungan pada dataset kedua menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan hasil Kalman Filter. Dari perbedaan tersebut dapat disimpulkan perbedaan hasil ini bukan merupakan error dari implementasi algoritma, tetapi sebuah temuan yang menyoroti bagaimana sensitivitas Kalman Filter terhadap konfigurasinya. Karakteristik ini berbanding terbalik dengan hasil data sensor dataset pertama yang lebih responsif terhadap perubahan sinyal sensor, menandakan perlunya tuning parameter yang lebih baik sesuai sistem yang diperlukan.

3.3.3. Kinerja Kontrol Logika Fuzzy

Bagian ini menjelaskan hasil penerapan logika fuzzy untuk membuat keputusan kontrol kipas dalam merespon perubahan suhu. Bagaimana kemampuan logika fuzzy untuk mengontrol kecepatan kipas dari filter suhu oleh Kalman Filter (\hat{x}_k) dalam bentuk derajat celsius menjadi PWM menggunakan dataset kedua.

1. Fuzzifikasi

Contoh proses pengambilan keputusan oleh logika fuzzy, diambil data terfilter suhu dalam 26,01 °C dan 30,6°C untuk suhu luar ruangan. Pada suhu dalam fungsi himpunan fuzzy hangat nyaman dan suhu luar dengan fungsi himpunan fuzzy menunjukkan rentang panas.

$$\mu_{hangatnyaman} = \frac{26,01 - 25,8}{27,1 - 25,8} = 0,162, \quad 25,8 < x < 27,1 \quad (10)$$

$$\mu_{panas} = 1, \quad 30 < x < 35 \quad (11)$$

2. Inferensi

Logika ini menghasilkan derajat aktivasi aturan dari derajat keanggotaan yang diaplikasikan pada aturan-aturan fuzzy. Penerapan aturan fuzzy ke-9 yang menyatakan apabila suhu dalam hangat nyaman dan suhu luar panas, maka perputaran kipas sangat cepat. Derajat aktivasi aturan (α) dari hasil perhitungan fuzzifikasi di atas diambil nilai derajat keanggotaan $\mu_{hangatnyaman} = 0,162$. Kemudian, hasil derajat keanggotaan dari derajat aktivasi aturan digunakan untuk menghitung nilai *crisp* parsial (z).

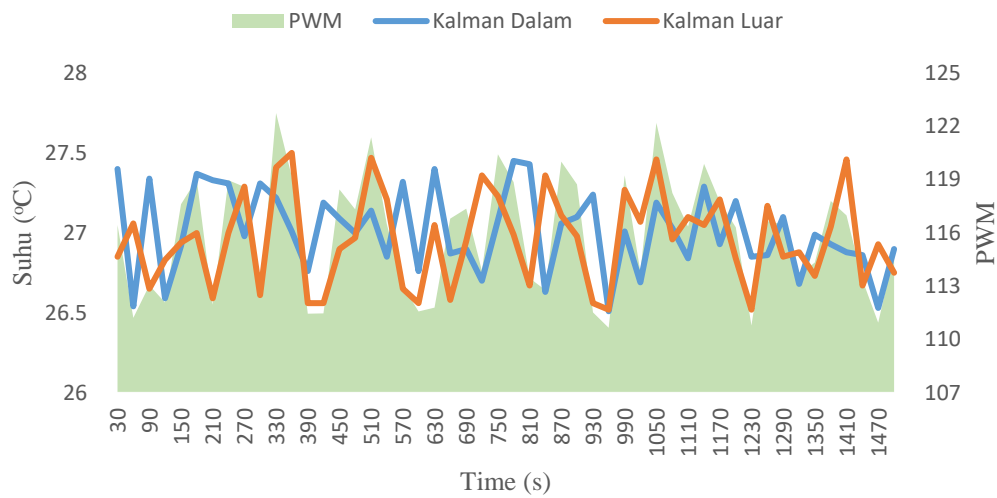
$$z = 175 + 0,162(255 - 175) = 187,96 \quad (12)$$

3. Defuzzifikasi

Logika terakhir dari logika fuzzy, yaitu mengubah nilai *crisp* parsial menjadi PWM yang diaplikasikan pada motor kipas angin. Detail perubahan *crisp* parsial disajikan di bawah ini.

$$PWM = \frac{(0,162 \times 187,96)}{0,162} = 187,96 \quad (13)$$

3.3.4. Pengujian Respon Kecepatan Kipas

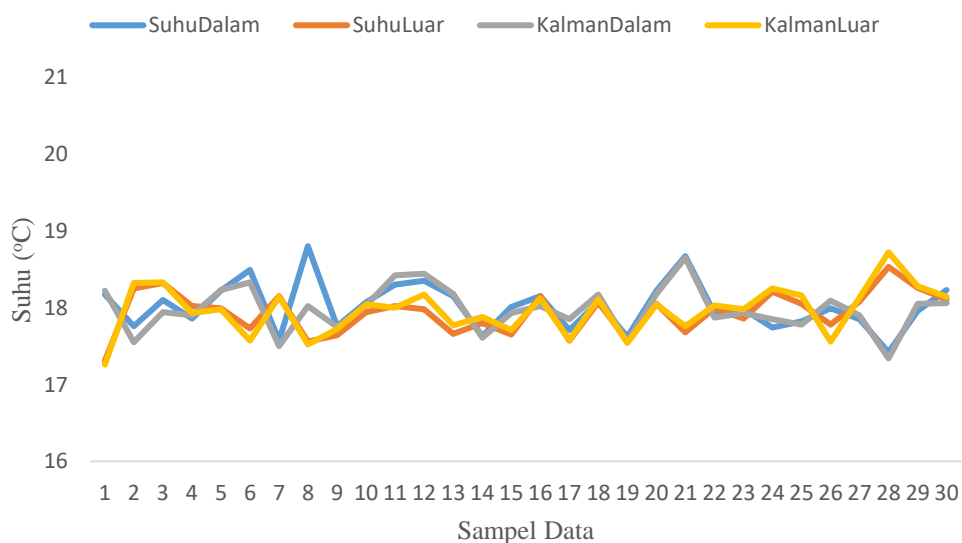


Gambar 12. Grafik PWM terhadap Perubahan Suhu Hasil Estimasi Kalman Filter

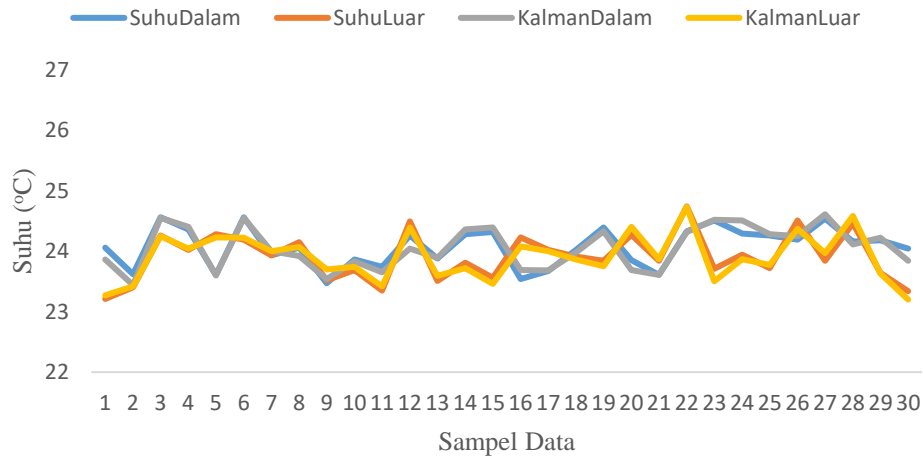
Hasil visualisasi pada Gambar 12 menunjukkan hubungan antara hasil perhitungan Kalman Filter dengan hasil PWM yang dihasilkan dari logika fuzzy yang dipakai. Garis berwarna biru merupakan hasil perhitungan kalman pada dalam ruangan sementara garis berwarna jingga merupakan estimasi kalman pada suhu luar ruangan, untuk area berwarna hijau merupakan respon PWM. Grafik yang dihasilkan membuktikan logika fuzzy berhasil merespon secara *real-time*. Terlihat pada detik 330, PWM tertinggi dengan nilai 122,33 dan *input* kalman dalam sebesar 27,22°C serta kalman luar ruangan 27,41°C, sedangkan PWM terendah 110,66 pada detik 960 dengan input 26,51°C dan kalman luar 26,52°C. Hal ini menunjukkan bahwa aturan fuzzy yang digunakan telah bekerja dengan baik sesuai dengan input meskipun bersifat fluktuatif.

3.4. Pengujian Robustness (Kondisi Terkontrol)

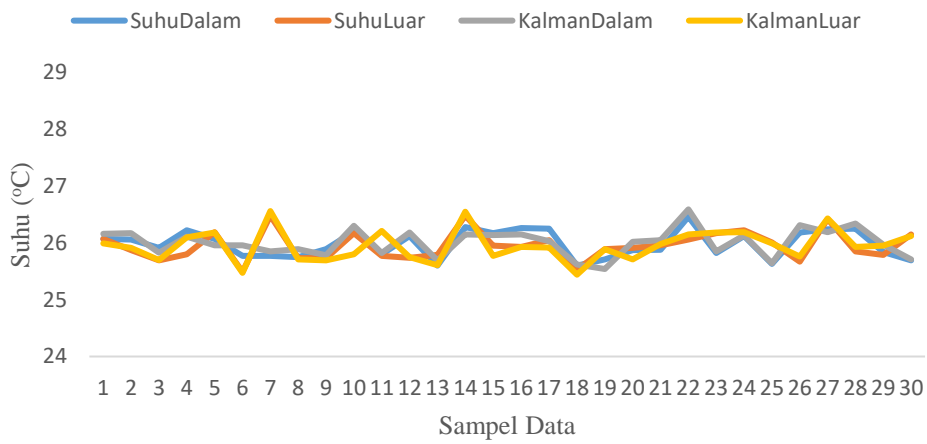
Hasil dataset kedua dengan lingkungan tidak terkontrol menggunakan suhu target dalam ruangan 25°C dan luar ruangan 29°C menghasilkan nilai estimasi kalman yang tidak efektif untuk mereduksi derau suhu yang dibaca oleh LM35. Hasil ini menyebabkan perlu adanya pembahasan lebih lanjut mengenai apakah nilai parameter Kalman Filter dengan yang ditetapkan *robust* terhadap suhu lingkungan yang lebih bervariasi. Ruangan ber-AC digunakan sebagai lingkungan terkontrol dengan suhu lingkungan yang divariasikan diantara 18°C, 24°C, 26°C, dan 29°C. Hasil yang diperoleh merupakan perbandingan data mentah dan nilai estimasi Kalman Filter pada lingkungan terkontrol ditampilkan Gambar 13 sampai Gambar 16.



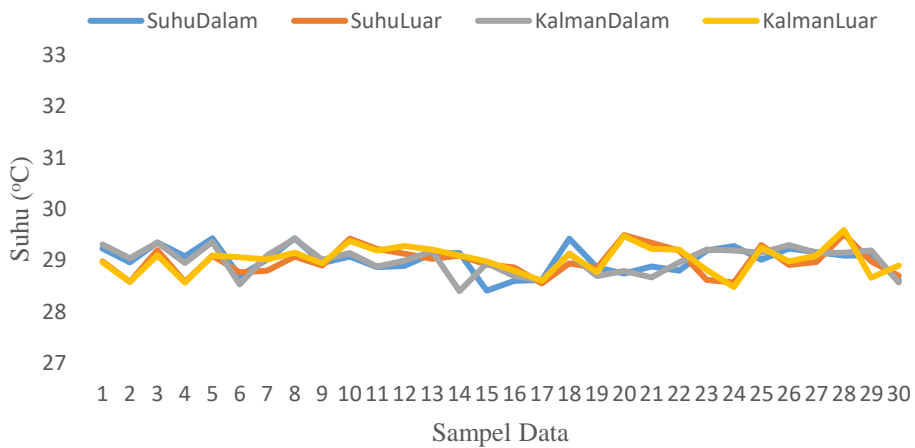
Gambar 13. Perbandingan Data Mentah Sensor dan Estimasi Kalman Filter pada Lingkungan Terkontrol Suhu 18°C



Gambar 14. Perbandingan Data Mentah Sensor dan Estimasi Kalman Filter pada Lingkungan Terkontrol Suhu 24°C



Gambar 15. Perbandingan Data Mentah Sensor dan Estimasi Kalman Filter pada Lingkungan Terkontrol Suhu 26°C



Gambar 16. Perbandingan Data Mentah Sensor dan Estimasi Kalman Filter pada Lingkungan Terkontrol Suhu 29°C

Gambar-gambar di atas menunjukkan hasil dari eksperimen sistem pada lingkungan terkontrol di beberapa suhu berbeda, dari keempat suhu lingkungan yang diuji pada sistem, secara visual Kalman Filter kurang bisa mereduksi fluktuasi sinyal asli. Dapat disimpulkan bahwasannya parameter Kalman Filter yang dipakai dengan konfigurasi nilai $P = 1$, $R = 0.25$, dan $Q = 0.001$ tidak dapat beroperasi dengan baik pada kondisi ini.

Kemungkinan terbesar penyebab Kalman Filter pada sistem bekerja kurang baik karena faktor *tuning* variabel Q yang kami lakukan saat *trial-and-error*, nilai variabel Q terlalu kecil menyebabkan filter lebih konservatif terhadap perubahan yang mendadak, filter akan berperilaku lebih mempercayai model prediksinya, dan kurang mempercayai fluktuasi hasil data sensor. Selain nilai Q yang terlalu kecil, ada kemungkinan lain yang menyebabkan masalah ini, yaitu nilai R yang tidak seimbang terhadap nilai Q yang dipakai. Kalman Gain yang dituliskan pada rumus nomor 5 merupakan alasan di mana rasio Q dengan R ini sangat bisa memengaruhi hasil perhitungan Kalman Filter. Nilai P_k dipengaruhi nilai Q yang bernilai lebih kecil dari nilai R akan membuat hasil perhitungan Kalman Gain mendekati 0, artinya sistem akan mengabaikan hasil nilai yang dihasilkan oleh sensor. Jadi kesimpulannya karena nilai Q dan R yang tidak mempercayai sensor dan lebih percaya pada model menghasilkan nilai Kalman Filter yang lag atau lambat dalam mengatasi fluktuasi hasil pengukuran oleh sensor.

4. KESIMPULAN

Hasil prototipe pada penelitian ini berhasil mengembangkan dan mengimplementasikan sistem kontrol suhu berbasis Kalman Filter dan logika fuzzy dalam dan luar ruangan. Tujuan penelitian ini untuk memastikan Kalman Filter dapat bekerja secara optimal dan membuat pencapaian kontrol suhu adaptif menyesuaikan suhu lingkungan sekitar. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa Kalman Filter dengan parameter yang dipakai belum dapat mereduksi fluktuasi sinyal asli dan menghasilkan estimasi suhu yang stabil juga halus pada kondisi tertentu. Oleh karena itu, perlunya penyesuaian parameter Kalman Filter yang lebih baik agar sesuai dengan karakteristik derau dan menjadikan estimasi suhu yang dihasilkan lebih optimal dan dapat meningkatkan ketahanan sistem. Hasil kinerja logika fuzzy menggunakan metode inferensi Tsukamoto berhasil menginterpretasikan kondisi suhu dalam dan luar ruangan yang terfilter menjadi keputusan kontrol kecepatan kipas yang adaptif. *Output* PWM kipas menunjukkan respon yang sesuai dengan aturan fuzzy yang sudah ditetapkan. Integrasi keseluruhan sistem, mulai dari akuisisi data sensor, Kalman Filter, logika fuzzy, dan *output* motor kipas pada sistem kontrol suhu ini diharapkan mampu membantu menyediakan kenyamanan bagi penghuninya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. H. Merabet *et al.*, "Intelligent Building Control Systems for Thermal Comfort and Energy-Efficiency: A Systematic Review of Artificial Intelligence-Assisted Techniques," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2021, doi: 10.1016.
- [2] B. T. Haryanto, D. Susilo, S. H. Anwariningsih, P. S. Informatika, U. S. Surakarta, and J. A. Sucipto, "Pengaturan Kipas Angin Otomatis menggunakan Sensor LM35 Berbasis Arduino di Sate Kambing Mbak Wid," *J. Ilm. Sains dan Teknol.*, vol. 3, pp. 1–12, 2021.
- [3] P. T. Elektro, J. T. Elektro, and F. Teknik, "Implementasi filter kalman dan logika fuzzy pada sistem kendali motor servo," Universitas Negeri Semarang, 2020.
- [4] A. Microcontroller, "Target Areas," *Lancet*, vol. 300, no. 7770, p. 222, 1972, doi: 10.1016/S0140-6736(72)91649-2.
- [5] Texas Instrument, "LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors Literature Number: SNIS159B," 2013, [Online]. Available: www.national.com
- [6] Seeed Studio, "JGA25-370 Geared Motor," *Seeed Technol. Co., Ltd*, 2019, [Online]. Available: [https://www.seeedstudio.com/JGA25-370-Geared-Motor-p-4119.html/8-14-1%0Ahttps://media.digkey.com/pdf/Data Sheets/Seeed Technology/114090046_Web.pdf](https://www.seeedstudio.com/JGA25-370-Geared-Motor-p-4119.html/8-14-1%0Ahttps://media.digkey.com/pdf/Data%20Sheets/Seeed%20Technology/114090046_Web.pdf)
- [7] C. Urrea and R. Agramonte, "Kalman Filter : Historical Overview and Review of Its Use in Robotics 60 Years after Its Creation," *Hindawi J. Sens.*, vol. 2021, no. 1, 2021, doi: 10.1155/2021/9674015.
- [8] P. A. Topan, "Optimasi Pengukuran Suhu Sensor LM35 Menggunakan Kalman Filter," vol. 9, no. 2, pp. 141–147, 2022.
- [9] A. R. Fayek, D. Ph, P. Eng, and M. Asce, "Fuzzy Logic and Fuzzy Hybrid Techniques for Construction Engineering and Management," *ASCE*, vol. 146, no. 7, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001854.
- [10] BSN, *Tata Cara Perancangan Sistem Ventilasi dan Pengkondisian Udara pada Bangunan Gedung*. 2001. [Online]. Available: https://pdfdokumen.com/download/sni-03-6572-2001-tata-cara-perencanaan-sistem-ventilasi-dan-pengkondisian-udara-pada-bangunan-gedung_5a38b43d1723dda9dc05a37e_pdf
- [11] M. Handayani, "Persepsi Masyarakat Terkait Kenyamanan Termal Di Pemukiman Padat (Non-AC) Kecamatan Dukuh Pakis Kota Surabaya," *Swara Bhumi*, vol. 4, pp. 1–7, 2016.
- [12] G. B. D. Prasanda, W. N. P. Sunaryo, D. C. R. Novitasari, A. Z. Arifin, and A. Fanani, "Penerapan Fuzzy Inference System dalam Pengoptimalan Suhu Ruangan pada Double Air Cinditioner (AC) secara Otomatis," *MATH Vis.*, vol. 01, no. 01, pp. 12–17, 2019.
- [13] R. Rumfot, Y. A. Lesnussa, and D. L. Rahakbauw, "Perbandingan Metode Fuzzy Mamdani, Sugeno Dan Tsukamoto Untuk Menentukan Jumlah Produksi Batu Pecah," *MATHunesa J. Ilm. Mat.*, vol. 12, no. 1, pp. 157–168, 2024, doi:

- 10.26740/mathunesa.v12n1.p157-168.
- [14] T. P. Sihaloho, M. K. M. Nasution, and Z. Situmorang, "Level of student satisfaction on lecturer performance with fuzzy inference system (FIS) tsukamoto method," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 725, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/725/1/012130.
 - [15] Sunardi, A. Yudhana, and Furizal, "Tsukamoto Fuzzy Inference System on Internet of Things-Based for Room Temperature and Humidity Control," *IEEE ACCESS*, vol. 11, pp. 6209–6227, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3236183.
 - [16] U. Al Gharany, Endryansyah, R. R. H. P. A. Tjahyaningtjas, and M. Rohman, "Perbaikan Unjuk Kerja Sistem Kontrol Long Travel Gantry Crane dengan Metode Fuzzy Logic," *J. Tek. Elektro*, vol. 13, no. 3, pp. 256–264, 2024.
 - [17] D. Setiyawan, A. Arbansyah, and A. J. Latipah, "Fuzzy Inference System Metode Tsukamoto Untuk Penentuan Program Studi Fakultas Sains Dan Teknologi Di Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur," *JIKO (Jurnal Inform. dan Komputer)*, vol. 7, no. 1, p. 23, 2023, doi: 10.26798/jiko.v7i1.657.

