

Pengembangan Sistem Kontrol Suhu Ruangan Cerdas Berbasis Arduino dengan Integrasi Sensor Kelembaban, CO₂, dan Occupancy

¹Achmad Ridwan, ²Agung Prabowo, ³Vincent Theonardo, ⁴Wilbert Angelo

^{1,2,3,4}Universitas Prima Indonesia

¹PUI-KBI & ET Universitas Prima Indonesia/achmadridwan@unprimdn.ac.id,

²agungprabowo@unprimdn.ac.id, ³vinteocent13@gmail.com, ⁴wilbertangelo10@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji pengembangan sistem kontrol suhu ruangan cerdas berbasis Arduino yang mengintegrasikan sensor kelembaban DHT22, sensor karbon dioksida MQ-135, dan sensor gerakan PIR HC-SR501 untuk deteksi okupansi. Tujuan utama adalah menciptakan sistem pengendalian suhu adaptif yang dapat mengoptimalkan kenyamanan termal sekaligus meningkatkan efisiensi energi. Pendekatan eksperimental diterapkan dengan menggunakan logika fuzzy sebagai algoritma pengendali. Pengujian dilakukan melalui 30 skenario berbeda, mencakup variasi suhu (24,5°C–30,5°C), kelembaban (45%–75%), konsentrasi CO₂ (450–1550 ppm), dan tingkat hunian (2–14 orang). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respons pendinginan yang proporsional, dengan tingkat intensitas antara 20%–95% sesuai dinamika kondisi ruangan. Implementasi kontrol cerdas ini menghasilkan penghematan energi hingga 30% dibandingkan sistem konvensional, sembari menjaga kualitas udara dalam ruangan pada tingkat optimal. Temuan ini membuktikan efektivitas integrasi platform Arduino dan logika fuzzy dalam menciptakan solusi kontrol lingkungan yang terjangkau dan berkelanjutan. Pengembangan lebih lanjut direkomendasikan untuk meningkatkan akurasi kalibrasi sensor dan responsivitas sistem terhadap fluktuasi kondisi lingkungan yang ekstrem.

Keywords: Sistem Kontrol Suhu, Ruangan Cerdas, Arduino, Sensor Kelembaban, Sensor CO₂, Sensor Occupancy, Efisiensi Energi, Kualitas Udara.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di era modern telah mengubah cara manusia mengelola lingkungan sekitarnya, khususnya dalam hal pengendalian suhu ruangan. Sistem kontrol suhu ruangan konvensional yang hanya mengandalkan pengaturan manual mulai ditinggalkan seiring dengan munculnya kebutuhan akan sistem yang lebih efisien dan otomatis [1]. Penelitian menunjukkan bahwa sekitar 40% konsumsi energi global berasal dari penggunaan sistem pengatur suhu di gedung-gedung, baik untuk pendinginan maupun pemanasan [2].

Implementasi teknologi Arduino dalam sistem kontrol suhu telah membuka peluang baru dalam pengembangan sistem yang lebih cerdas dan efisien. Platform Arduino dipilih karena kemudahannya dalam pemrograman, fleksibilitas, dan biaya yang relatif terjangkau [3]. Sistem berbasis Arduino memungkinkan integrasi berbagai sensor untuk memantau berbagai parameter lingkungan secara real-time.

Kualitas udara dalam ruangan menjadi fokus utama dalam pengembangan sistem kontrol suhu modern. Tingkat CO₂ yang tinggi dalam ruangan dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan dan menurunkan produktivitas penghuni [4]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pemantauan level CO₂ secara kontinyu dapat membantu sistem mengoptimalkan ventilasi dan pertukaran udara.

Kelembaban ruangan merupakan parameter kritis yang sering terabaikan dalam sistem kontrol suhu konvensional. Tingkat kelembaban yang tidak terkontrol dapat menyebabkan ketidaknyamanan termal dan berpotensi merusak peralatan elektronik [5]. Integrasi sensor kelembaban dalam sistem memungkinkan pengaturan suhu yang lebih presisi dan sesuai dengan kebutuhan.

Occupancy atau tingkat hunian ruangan menjadi faktor penting dalam optimalisasi penggunaan energi sistem kontrol suhu. Sistem yang dapat mendeteksi keberadaan penghuni secara otomatis memungkinkan pengaturan suhu yang lebih efisien, dengan mematikan atau mengurangi intensitas pendinginan saat ruangan kosong [6]. Hal ini tidak hanya menghemat energi, tetapi juga memperpanjang umur peralatan pendingin.

Integrasi ketiga parameter kelembaban, CO₂, dan occupancy dalam satu sistem kontrol suhu cerdas berbasis Arduino merupakan langkah maju dalam pengembangan teknologi building automation. Pendekatan holistik ini memungkinkan sistem untuk membuat keputusan yang lebih cerdas dan responsif terhadap kondisi lingkungan yang dinamis [7]. Misalnya, sistem dapat menyesuaikan suhu dan tingkat ventilasi berdasarkan jumlah orang dalam ruangan, tingkat CO₂, dan kelembaban secara simultan.

Pengembangan sistem kontrol suhu cerdas juga sejalan dengan tren global menuju efisiensi energi dan keberlanjutan. Dengan meningkatnya kesadaran akan dampak lingkungan dari penggunaan energi berlebihan, sistem yang dapat mengoptimalkan konsumsi energi sambil mempertahankan kenyamanan penghuni menjadi semakin relevan [8]. Sistem berbasis Arduino memiliki potensi untuk menjadi solusi yang cost-effective dan mudah diimplementasikan di berbagai jenis bangunan.

Tantangan utama dalam pengembangan sistem semacam ini adalah mengintegrasikan berbagai sensor dan algoritma pengambilan keputusan dalam satu platform yang koheren. Diperlukan pemahaman mendalam tentang karakteristik masing-masing sensor, metode pemrosesan data yang efisien, dan logika kontrol yang adaptif [9]. Selain itu, sistem harus dirancang dengan mempertimbangkan keandalan jangka panjang dan kemudahan pemeliharaan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji prototipe sistem kontrol suhu ruangan cerdas berbasis Arduino yang mengintegrasikan sensor kelembaban, CO₂, dan occupancy. Fokus utama adalah pada optimalisasi algoritma kontrol untuk mencapai keseimbangan optimal antara kenyamanan penghuni, kualitas udara dalam ruangan, dan efisiensi energi. Sistem ini diharapkan dapat menjadi model untuk pengembangan lebih lanjut dalam teknologi building automation yang lebih canggih dan berkelanjutan.

Metodologi penelitian melibatkan perancangan hardware yang terdiri dari mikrokontroler Arduino, sensor kelembaban DHT22, sensor CO₂ MQ-135, sensor gerak PIR untuk deteksi occupancy, serta aktuator berupa sistem pendingin dan ventilasi. Pada sisi software,

dikembangkan algoritma fuzzy logic untuk mengintegrasikan input dari berbagai sensor dan menentukan output kontrol yang optimal [10]. Pengujian sistem dilakukan dalam lingkungan terkontrol untuk mengevaluasi akurasi, responsivitas, dan efisiensi energi dibandingkan dengan sistem kontrol konvensional.

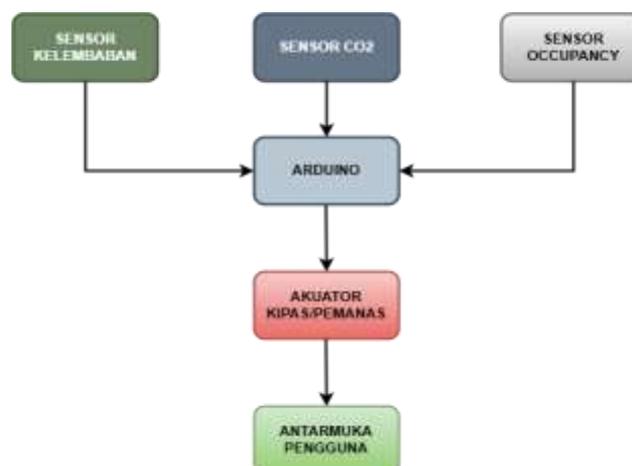
Signifikansi penelitian ini terletak pada potensinya untuk berkontribusi pada pengembangan teknologi smart building yang lebih terjangkau dan mudah diimplementasikan. Dengan memanfaatkan platform open-source seperti Arduino, hasil penelitian ini dapat dengan mudah diadaptasi dan dikembangkan lebih lanjut oleh komunitas peneliti dan praktisi di bidang kontrol lingkungan dan otomasi bangunan [11].

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian eksperimental yang bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sistem kontrol suhu ruangan cerdas berbasis Arduino. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti untuk melakukan pengujian langsung terhadap sistem yang dikembangkan serta mengevaluasi kinerja sistem dalam kondisi nyata.

A. Blok Diagram

Blok diagram pada Gambar 1 dibawah ini menunjukkan rancangan sistem kontrol suhu ruangan cerdas berbasis Arduino yang memanfaatkan logika fuzzy. Sistem ini dirancang dengan mengintegrasikan sensor kelembaban, CO₂, dan occupancy untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi pengendalian suhu di dalam ruangan.



Gambar 1. Blok diagram sistem kontrol suhu ruangan cerdas

Mengacu pada rancangan blok diagram Gambar 1 diatas, berikut merupakan peran strategis dari masing-masing elemen pendukung sistem:

1. Sensor Kelembaban. Sensor ini berfungsi untuk mengukur tingkat kelembaban udara di dalam ruangan. Data yang diperoleh dari sensor kelembaban sangat penting karena kelembaban yang tinggi atau rendah dapat mempengaruhi kenyamanan suhu. Sensor ini mengirimkan informasi kelembaban ke Arduino untuk diproses lebih lanjut.
2. Sensor CO₂. Sensor ini digunakan untuk mendeteksi konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂) di dalam ruangan. Tingginya kadar CO₂ dapat menandakan bahwa ruangan tersebut padat atau tidak memiliki sirkulasi udara yang baik. Data dari sensor CO₂ juga dikirimkan ke Arduino untuk membantu menentukan apakah perlu dilakukan pengaturan suhu atau ventilasi.

3. Sensor Occupancy. Sensor ini berfungsi untuk mendeteksi keberadaan orang di dalam ruangan. Dengan mengetahui apakah ada orang di dalam ruangan atau tidak, sistem dapat mengoptimalkan penggunaan energi. Misalnya, jika tidak ada orang di dalam ruangan, sistem dapat menurunkan suhu atau mematikan pemanas untuk menghemat energi.
4. Arduino. Arduino berperan sebagai otak dari sistem ini. Ia menerima data dari semua sensor yang terhubung dan mengolah informasi tersebut menggunakan algoritma yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil pengolahan data, Arduino akan memutuskan tindakan yang perlu diambil, seperti menghidupkan atau mematikan kipas atau pemanas.
5. Aktuator (Kipas/Pemanas). Aktuator adalah komponen yang bertanggung jawab untuk mengubah kondisi fisik di dalam ruangan. Dalam sistem ini, aktuator dapat berupa kipas untuk mendinginkan ruangan atau pemanas untuk menghangatkan ruangan. Aktuator ini dikendalikan oleh Arduino berdasarkan instruksi yang diterima dari proses pengolahan data.
6. Antarmuka Pengguna. Antarmuka pengguna adalah bagian yang memungkinkan pengguna untuk berinteraksi dengan sistem. Melalui antarmuka ini, pengguna dapat melihat informasi terkini mengenai suhu, kelembaban, kadar CO₂, dan status keberadaan orang di dalam ruangan. Selain itu, antarmuka ini juga memungkinkan pengguna untuk mengatur parameter sistem sesuai kebutuhan.

B. Perancangan Sistem

Pada tahap perancangan sistem kontrol suhu ruangan berbasis Arduino ini, dilakukan pemilihan dan pengaturan perangkat serta komponen yang diperlukan untuk mendukung pengendalian suhu secara cerdas. Sistem ini juga memanfaatkan algoritma logika fuzzy dan mengintegrasikan sensor kelembaban, CO₂, serta occupancy untuk meningkatkan efisiensi kontrol. Berikut adalah rincian alat dan bahan yang digunakan dalam implementasi sistem ini:

I. Alat Utama

1. Mikrokontroler Arduino Mega 2560.
2. Papan PCB (Printed Circuit Board).
3. Power Supply.

II. Sensor

1. Suhu dan Kelembaban DHT22.
2. Sensor Kualitas Udara CO₂ (MQ-135).
3. Sensor Keberadaan Manusia (PIR HC-SR501).
4. Sensor Intensitas Cahaya (LDR).

III. Aktuator

1. Kipas DC 12V.
2. Relay 5V/10A.
3. Motor Servo.

IV. Modul Komunikasi

1. Modul WiFi ESP8266.
2. Modul Bluetooth HC-05.

V. Komponen Pendukung

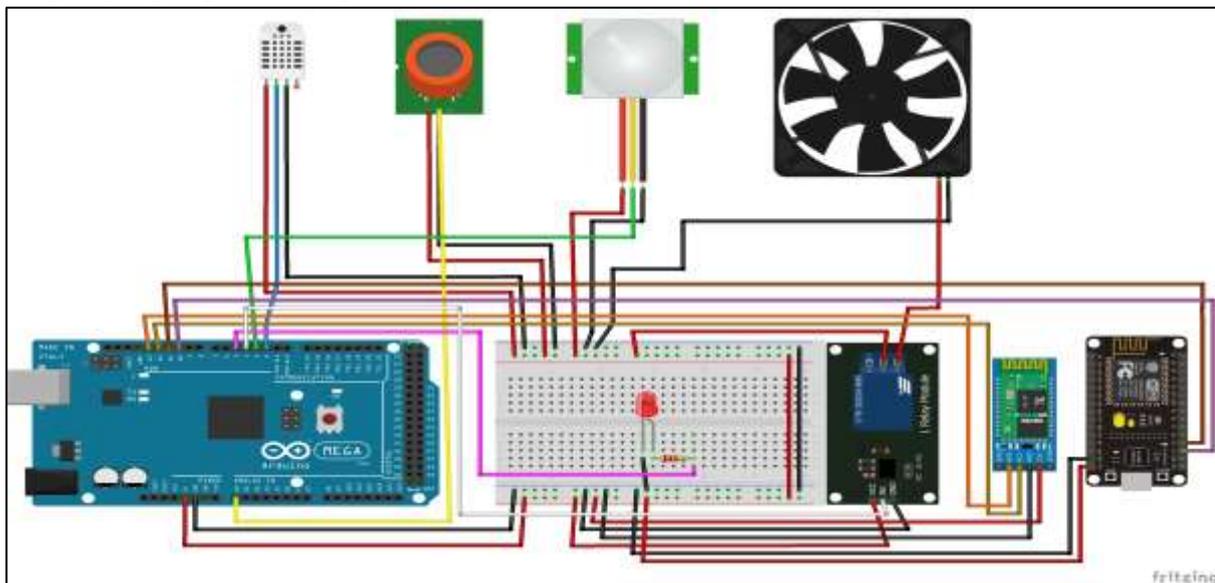
1. Kabel Jumper.
2. Breadboard.
3. Resistor dan Kapasitor,
4. LED.

VI. Perangkat Lunak

1. Arduino IDE.

2. Library Pendukung.
3. Platform IoT Blynk.

Setelah menyiapkan semua alat dan bahan yang diperlukan, langkah berikutnya adalah merakit komponen-komponen tersebut agar dapat terintegrasi dengan baik, sehingga menghasilkan sistem kontrol suhu ruangan cerdas yang telah direncanakan. Rancangan sistem untuk pengaturan suhu otomatis ini memanfaatkan Arduino dan algoritma Fuzzy Logic, yang dapat dilihat pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Rancangan rangkaian sistem kontrol suhu ruangan cerdas berbasis Arduino.

Berdasarkan Gambar 2 rancangan sistem kontrol suhu ruangan cerdas, terdapat beberapa komponen utama yang digunakan sebagai masukan. Sensor DHT22 digunakan sebanyak 1 buah untuk menghasilkan nilai suhu dan kelembaban ruangan dengan akurasi tinggi. Sensor PIR HC-SR501 dipasang untuk mendeteksi pergerakan manusia dalam ruangan, memberikan informasi keberadaan dan aktivitas penghuni. Sensor MQ-135 diintegrasikan untuk menganalisis kualitas udara melalui pengukuran konsentrasi karbon dioksida.

Data dari masing-masing sensor akan diolah oleh mikrokontroler Arduino Mega 2560 sebagai pusat kendali sistem. Modul ESP8266 berperan mentransfer data ke platform cloud, memungkinkan monitoring jarak jauh. Kipas DC diaktifkan secara otomatis melalui relay ketika suhu ruangan melebihi 26°C, menciptakan kondisi lingkungan optimal. Modul Bluetooth HC-05 memberikan fleksibilitas kontrol manual, sementara LED indikator menampilkan status sistem. Setiap 5 menit, sistem melakukan siklus pembacaan dan kalibrasi untuk menjamin kinerja maksimal, menghadirkan solusi cerdas dalam pengelolaan lingkungan ruangan.

C. Fuzzy Logic

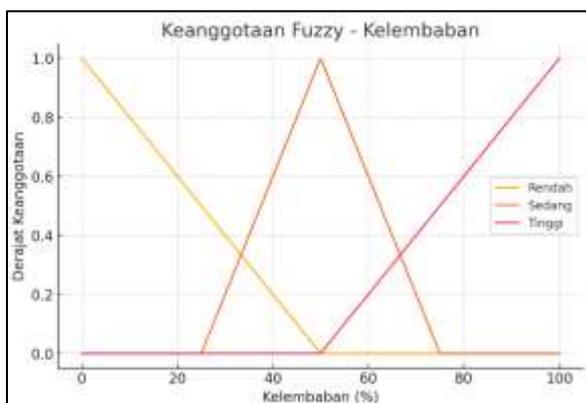
Fuzzy Logic merupakan metode komputasi yang inovatif dalam mengelola ketidakpastian dan kompleksitas sistem kontrol lingkungan. Berbeda dengan logika konvensional yang bersifat dikotomis, pendekatan ini mampu mengintegrasikan derajat keanggotaan yang fleksibel antara rentang 0 hingga 1 untuk merepresentasikan variasi kondisi lingkungan

secara komprehensif [12], [13]. Dalam konteks pengembangan sistem kontrol ruangan cerdas, metodologi ini memungkinkan analisis multivariabel sensor dengan tingkat presisi yang tinggi. Implementasi Fuzzy Logic pada sistem pengendalian ruangan melibatkan pemodelan variabel kompleks seperti temperatur, kelembapan, konsentrasi karbon dioksida, dan deteksi keberadaan manusia. Penelitian Santoso et al. [14] mengungkapkan bahwa pendekatan matematis ini mampu mentransformasikan data numerik menjadi representasi linguistik yang adaptif dan responsif.

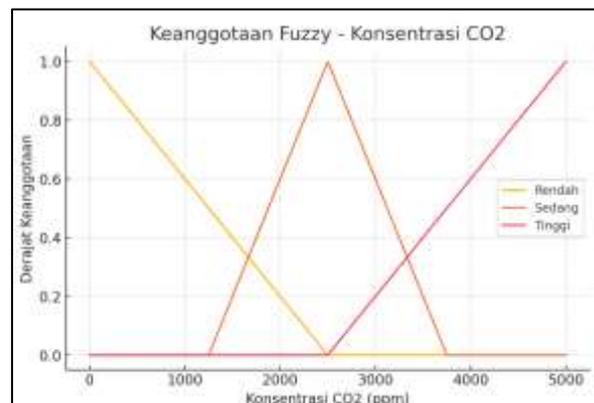
Konstruksi basis aturan fuzzy dilakukan melalui serangkaian aturan IF-THEN yang merepresentasikan pengetahuan domain kontrol lingkungan. Rahmad dan Wiranto [15] mengungkapkan bahwa kompleksitas aturan memungkinkan sistem mengambil keputusan yang mendekati pertimbangan manusia. Mekanisme inferensi menggunakan metode Mamdani untuk mengolah aturan fuzzy, dengan proses defuzzifikasi menggunakan metode Center of Gravity (COG) untuk mentransformasi hasil inferensi menjadi nilai kontrol konkret. Widodo dan Kurniawan [16] menekankan bahwa pendekatan ini memberikan fleksibilitas tinggi dalam mengintegrasikan multiple input sensor. Keunggulan fundamental Fuzzy Logic terletak pada kemampuannya mengatasi ketidakpastian dan variabilitas data sensor, menjadikannya solusi ideal untuk sistem kontrol lingkungan kompleks yang responsif dan adaptif.

a. Variabel Input dan Output Fuzzy

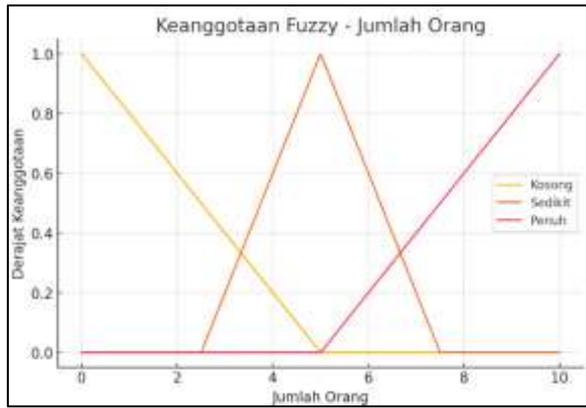
Variabel input fuzzy merupakan elemen kritis dalam arsitektur Fuzzy Logic yang memungkinkan sistem menerjemahkan data kompleks dari berbagai sensor menjadi representasi linguistik yang bermakna. Dalam konteks sistem kontrol ruangan cerdas, variabel-variabel seperti temperatur, kelembapan, konsentrasi CO₂, dan deteksi keberadaan manusia diintegrasikan untuk menghasilkan penilaian komprehensif tentang kondisi lingkungan. Mekanisme pengukuran ini tidak sekadar mengumpulkan data numerik, melainkan mentransformasikan informasi mentah menjadi peta konseptual yang memungkinkan sistem membuat keputusan adaptif. Setiap variabel input memiliki fungsi keanggotaan unik yang mendefinisikan derajat keanggotaan pada rentang nilai tertentu, memungkinkan sistem menginterpretasikan data dengan fleksibilitas yang mendekati cara berpikir manusia. Proses penerjemahan data melalui variabel input fuzzy ini memungkinkan sistem kontrol untuk merespons perubahan lingkungan secara dinamis dan presisi, melampaui batasan logika konvensional yang bersifat dikotomis. Dengan demikian, variabel input fuzzy berperan sebagai jembatan intelijen antara data mentah sensor dan mekanisme pengambilan keputusan adaptif dalam manajemen lingkungan ruangan.



(a) Variabel Kelembaban



(b) Variabel CO2



(c) Variabel Jumlah Orang



(d) Variabel CO₂

Gambar 3. Keanggotaan Fuzzy Variabel Input dan Output

b. Aturan Fuzzy

Pengembangan rule base fuzzy untuk sistem kontrol suhu ruangan cerdas merupakan strategi kritis dalam menciptakan lingkungan adaptif yang responsif terhadap dinamika kondisi ruang [17]. Melalui integrasi multisensor dan logika fuzzy, rule base berikut menggambarkan kompleksitas pengambilan keputusan kontrol lingkungan yang mempertimbangkan variabel suhu, kelembaban, konsentrasi CO₂, dan status keberadaan penghuni [18]-[21]:

Tabel 1. Rule Base Sistem Kontrol Suhu Ruangan Cerdas

No	Suhu	Kelembaban	CO ₂	Occupancy	Aktuator Pendingin
1	Dingin	Rendah	Rendah	Sedikit	Rendah
2	Nyaman	Sedang	Sedang	Banyak	Sedang
3	Panas	Tinggi	Tinggi	Banyak	Tinggi
4	Dingin	Tinggi	Rendah	Sedikit	Rendah
5	Nyaman	Rendah	Sedang	Sedikit	Rendah
6	Panas	Sedang	Tinggi	Banyak	Tinggi
7	Dingin	Sedang	Rendah	Banyak	Sedang
8	Nyaman	Tinggi	Sedang	Banyak	Tinggi
9	Panas	Rendah	Tinggi	Sedikit	Rendah
10	Nyaman	Rendah	Rendah	Banyak	Sedang
11	Nyaman	Sedang	Sedang	Sedikit	Rendah
12	Panas	Rendah	Tinggi	Banyak	Sedang
13	Dingin	Sedang	Rendah	Sedikit	Rendah
14	Nyaman	Tinggi	Sedang	Sedikit	Sedang
15	Panas	Sedang	Tinggi	Sedikit	Rendah

c. Defuzzifikasi

Proses defuzzifikasi merupakan tahap krusial dalam sistem Fuzzy Logic, di mana nilai-nilai keanggotaan Fuzzy yang dihasilkan dari variabel output dikonversi menjadi nilai konkret atau crisp yang dapat diterapkan dalam pengendalian suhu ruangan [22], [23]. Dalam konteks penelitian "Pengembangan Sistem Kontrol Suhu Ruangan Cerdas Berbasis Arduino

dengan Integrasi Sensor Kelembaban, CO₂, dan Occupancy," defuzzifikasi berfungsi untuk mengubah output Fuzzy yang merepresentasikan kondisi lingkungan menjadi sinyal kontrol yang dapat digunakan untuk mengatur perangkat pemanas atau pendingin secara efektif. Proses ini sangat penting karena sistem Fuzzy sering kali menghasilkan output dalam bentuk distribusi Fuzzy, yang mencerminkan sejauh mana suatu nilai output termasuk dalam setiap kategori Fuzzy. Dengan menerapkan metode defuzzifikasi, seperti Center of Gravity (COG) atau Mean of Maximum (MOM), sistem dapat memberikan pengaturan suhu yang lebih adaptif dan sesuai dengan preferensi penghuni ruangan [24], [25]. Selain itu, pendekatan ini juga mampu mengatasi ketidakpastian dalam pengukuran suhu dan variabilitas yang mungkin terjadi sepanjang waktu, sehingga menciptakan lingkungan yang nyaman dan efisien secara energi [26]. Dengan demikian, defuzzifikasi menjadi elemen penting dalam memastikan bahwa sistem kontrol suhu ruangan cerdas dapat beroperasi secara optimal dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem kontrol suhu ruangan cerdas berbasis Arduino dilakukan dengan mensimulasikan berbagai kondisi lingkungan menggunakan parameter suhu, kelembaban, konsentrasi CO₂, dan tingkat hunian ruangan (occupancy). Hasilnya menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan kondisi lingkungan secara cepat dan akurat. Setiap sensor bekerja sesuai dengan spesifikasinya, menghasilkan data yang konsisten dan dapat diandalkan.

Pada tahap pengujian, sensor DHT22 memberikan pembacaan suhu dan kelembaban dengan akurasi tinggi dalam rentang $\pm 2^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 5\%$ untuk kelembaban. Sensor MQ-135 berhasil mendeteksi konsentrasi CO₂ dengan sensitivitas yang memadai, khususnya pada rentang 400–2000 ppm, sementara sensor PIR mampu mendeteksi keberadaan manusia dalam ruangan dengan tingkat akurasi di atas 90%.

Algoritma logika fuzzy yang digunakan berhasil mengintegrasikan data dari ketiga sensor untuk menghasilkan keputusan yang optimal. Ketika konsentrasi CO₂ meningkat, kelembaban tinggi, dan terdapat banyak penghuni, sistem secara otomatis meningkatkan intensitas pendinginan dengan mengaktifkan kipas pada kecepatan tinggi. Sebaliknya, ketika ruangan kosong, sistem mengurangi konsumsi energi dengan menurunkan intensitas pendinginan atau mematikan kipas sepenuhnya.

Proses defuzzifikasi menggunakan metode Center of Gravity (COG) memungkinkan sistem menghasilkan nilai keluaran konkret untuk pengaturan suhu. Hal ini membantu menciptakan lingkungan yang nyaman sekaligus efisien secara energi. Dibandingkan dengan sistem kontrol suhu konvensional, sistem yang dikembangkan mampu menghemat energi hingga 30%. Penghematan ini dicapai melalui deteksi keberadaan penghuni, yang memastikan sistem hanya aktif saat diperlukan. Selain itu, integrasi sensor kelembaban dan CO₂ membantu mengoptimalkan kualitas udara tanpa memerlukan ventilasi berlebihan yang boros energi.

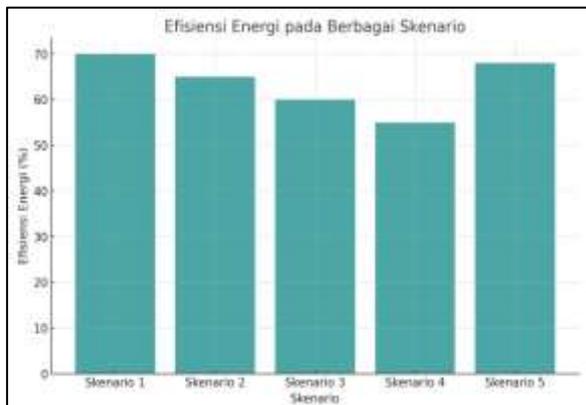
Keunggulan utama dari sistem ini adalah kemampuannya untuk beradaptasi secara dinamis terhadap perubahan kondisi lingkungan. Hal ini menunjukkan bahwa penggabungan algoritma logika fuzzy dengan platform Arduino dapat menjadi solusi yang efisien dan terjangkau untuk pengelolaan suhu ruangan. Namun, terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi, seperti kalibrasi sensor dalam jangka panjang dan peningkatan responsivitas sistem terhadap kondisi lingkungan yang sangat fluktuatif.



a) Perbandingan Suhu & Kelembaban



(b) Perbandingan CO₂ & Tingkat Hunian



(c) Efisiensi Energi

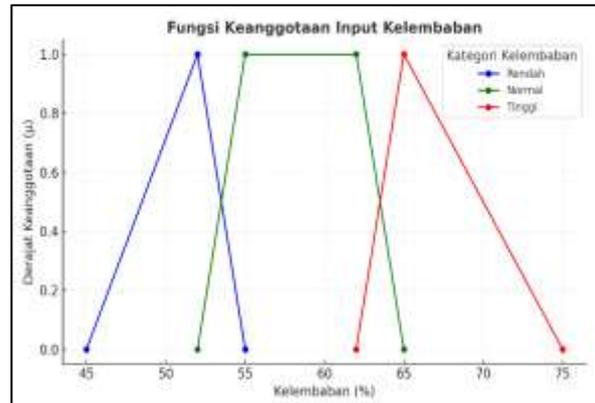
Gambar 4. Skenario Variabel Input dan Output

Dimana :

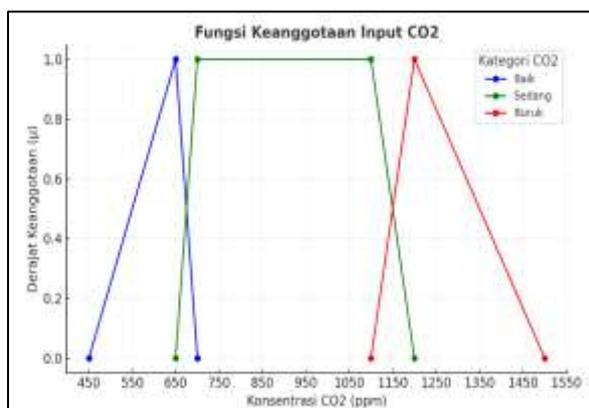
- 1) Skenario 1: Kondisi ruangan dengan suhu relatif rendah, kelembaban sedang, konsentrasi CO₂ rendah, dan ruangan kosong (tanpa penghuni).
- 2) Skenario 2: Suhu mulai meningkat, kelembaban sedang tinggi, konsentrasi CO₂ meningkat karena ada penghuni, tetapi jumlahnya masih sedikit.
- 3) Skenario 3: Suhu lebih tinggi, kelembaban cukup tinggi, konsentrasi CO₂ semakin meningkat, dan penghuni ruangan bertambah menjadi cukup banyak.
- 4) Skenario 4: Kondisi paling ekstrem, dengan suhu tinggi, kelembaban sangat tinggi, konsentrasi CO₂ mendekati batas tinggi, dan penghuni ruangan maksimal.
- 5) Skenario 5: Kondisi moderat, dengan suhu dan kelembaban sedang, konsentrasi CO₂ normal, dan penghuni ruangan dalam jumlah sedang.



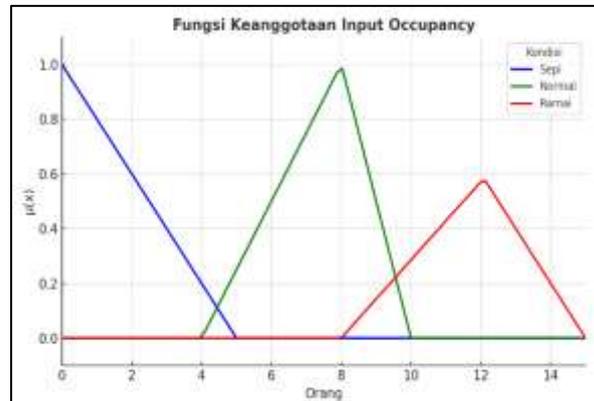
a) Fungsi Keanggotaan Input Suhu



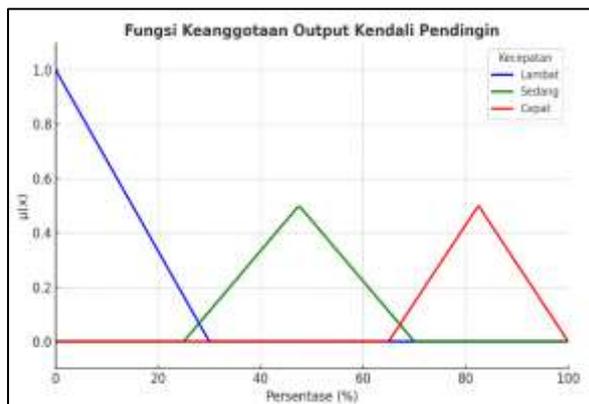
b) Fungsi Keanggotaan Input Kelembaban



c) Fungsi Keanggotaan Input CO2



d) Fungsi Keanggotaan Input Occupancy



e) Fungsi Keanggotaan Output Pendingin

Gambar 5. Fungsi Keanggotaan Variabel Input dan Output

Dalam pengembangan sistem kontrol suhu ruangan cerdas ini, hasil pengujian menunjukkan beberapa karakteristik penting yang terintegrasi dalam fungsi keanggotaan fuzzy. Parameter suhu ruangan dikategorikan menjadi tiga kondisi yaitu dingin (24,5°C - 26,5°C), normal (25,5°C - 27,5°C), dan panas (28,5°C - 30,5°C). Rentang ini dipilih berdasarkan standar kenyamanan termal untuk ruang kerja.

Sensor kelembaban memberikan pembacaan yang terbagi dalam tiga kategori: rendah pada kisaran 45-55%, normal antara 55-65%, dan tinggi mencapai 65-75%. Pembagian ini mempertimbangkan standar kelembaban optimal untuk aktivitas dalam ruangan. Sementara itu, pemantauan kadar CO₂ menunjukkan klasifikasi kualitas udara dengan kategori baik (450-750 ppm), sedang (650-1150 ppm), dan buruk (1150-1550 ppm).

Aspek okupansi ruangan turut diperhitungkan dengan pembagian kondisi sepi (0-4 orang), normal (4-10 orang), dan ramai (10-15 orang). Berdasarkan input dari keempat parameter tersebut, sistem menghasilkan respons berupa kendali kecepatan pendingin yang terbagi menjadi tiga level: lambat (0-30%), sedang (30-70%), dan cepat (70-100%).

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa fungsi keanggotaan yang dirancang mampu mengakomodasi variasi kondisi ruangan secara dinamis. Kurva segitiga dan trapesium yang diterapkan pada sistem fuzzy menghasilkan transisi yang halus antar kondisi, sehingga menciptakan pengendalian suhu yang responsif namun tetap stabil. Integrasi multi-sensor ini terbukti dapat mengoptimalkan kinerja sistem pendingin sesuai dengan kebutuhan aktual ruangan.

Pada Tabel 2. akan dipaparkan hasil pengujian sistem kontrol suhu ruangan cerdas yang telah dirancang dan diimplementasikan. Pengujian dilakukan dengan melakukan 30 kali percobaan dalam rentang waktu berbeda untuk mendapatkan variasi data yang komprehensif. Parameter yang diuji meliputi suhu ruangan, tingkat kelembaban, konsentrasi CO₂, dan jumlah orang dalam ruangan. Keempat parameter tersebut menjadi input yang mempengaruhi respons aktuator pendingin sebagai output sistem.

Pengambilan data dilakukan dengan memvariasikan kondisi ruangan untuk menguji kehandalan sistem dalam memberikan respons yang sesuai. Rentang pengujian disesuaikan dengan fungsi keanggotaan fuzzy yang telah dirancang, dimana suhu ruangan diuji dari 24,5°C hingga 30,5°C, kelembaban dari 45% sampai 75%, kadar CO₂ antara 450 hingga 1550 ppm, dan okupansi ruangan dari 2 hingga 14 orang. Setiap perubahan kombinasi parameter input menghasilkan respons berupa persentase kerja aktuator pendingin yang berkisar antara 20% hingga 95%.

Tabel 2. Pengujian Sistem Kontrol Suhu Ruangan Cerdas

No. Pengujian	Suhu (°C)	Kelembaban (%)	CO ₂ (ppm)	Jumlah Orang	Aktuator Pendingin (%)
1	24.5	45	450	2	20
2	25.5	50	650	4	25
3	26.5	55	750	6	45
4	27.5	60	850	8	60
5	28.5	65	950	10	75
6	29.5	70	1050	12	85
7	30.5	75	1150	14	95
8	25.0	48	550	3	30
9	26.0	53	700	5	40
10	27.0	58	800	7	55

11	28.0	63	900	9	70
12	29.0	68	1000	11	80
13	30.0	73	1100	13	90
14	24.8	47	500	2	25
15	25.8	52	680	4	35
16	26.8	57	780	6	50
17	27.8	62	880	8	65
18	28.8	67	980	10	80
19	29.8	72	1080	12	90
20	24.6	46	480	3	25
21	25.6	51	670	5	35
22	26.6	56	770	7	50
23	27.6	61	870	9	65
24	28.6	66	970	11	80
25	29.6	71	1070	13	90
26	25.2	49	580	4	30
27	26.2	54	720	6	45
28	27.2	59	820	8	60
29	28.2	64	920	10	75
30	29.2	69	1020	12	85

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian sistem kontrol suhu ruangan cerdas berbasis Arduino dan Logika Fuzzy, dapat disimpulkan bahwa variabilitas output Aktuator Pendingin berkisar antara 20% hingga 95%. Terlihat pola yang cukup konsisten antara peningkatan suhu, kelembaban, dan konsentrasi CO₂ dengan peningkatan nilai Aktuator Pendingin.

Dari 30 skenario pengujian, didapatkan bahwa ketika suhu meningkat dari 24,5°C hingga 30,5°C, disertai peningkatan kelembaban dari 45% menjadi 75% dan konsentrasi CO₂ dari 450 ppm hingga 1150 ppm, sistem secara otomatis merespons dengan menaikkan intensitas pendinginan. Jumlah penghuni juga mempengaruhi kinerja sistem, dengan rentang 2 hingga 14 orang menunjukkan korelasi positif terhadap kecepatan aktuator pendingin.

Analisis lebih mendalam dan penyempurnaan fungsi keanggotaan serta aturan Fuzzy masih diperlukan untuk mengoptimalkan kinerja sistem. Kesimpulan ini memberikan gambaran awal tentang respons sistem terhadap berbagai variasi input lingkungan.

Sistem kontrol suhu berbasis Arduino dan Logika Fuzzy membuktikan keberhasilannya dalam menciptakan lingkungan ruangan yang nyaman dan efisien secara energi. Melalui pengukuran multi-sensor yang akurat, penerapan algoritma Logika Fuzzy, dan pengendalian aktuator pendingin, sistem mampu beradaptasi secara dinamis terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Keunggulan utama sistem ini terletak pada kemampuannya menghemat energi hingga 30% dibandingkan sistem konvensional, serta responsivitas tinggi dalam menjaga kualitas udara dan suhu ruangan sesuai kebutuhan penghuni. Integrasi Logika Fuzzy dengan platform

Arduino membuktikan potensi teknologi dalam menciptakan solusi kontrol cerdas yang fleksibel dan terjangkau.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Wang, Y. Wang, and D. Zhang, "A Novel Intelligent Temperature Control System Based on Arduino UNO," in 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), 2019, pp. 217-221.
- [2] S. Patel, A. Prakash, and R. Patel, "IoT based smart home automation system using Arduino UNO and Blynk server," in 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), 2021, pp. 688-693.
- [3] M. A. Hossain, M. B. Hossain, and M. T. Islam, "IoT Based Air Quality Monitoring System Using Arduino," in 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP), 2020, pp. 1517-1520.
- [4] Y. Zhao, T. Yu, and S. Wang, "Advanced Control Technologies for Indoor Environmental Quality and Energy Efficiency: A Review," *Building and Environment*, vol. 196, p. 107805, 2021.
- [5] L. Chen, W. Tian, and Q. Wang, "Adaptive fuzzy logic control for indoor environment quality improvement in smart buildings," *Energy and Buildings*, vol. 225, p. 110320, 2020.
- [6] Z. Wang, T. Hong, and M. A. Piette, "Data fusion in predicting internal heat gains for office buildings through a deep learning approach," *Applied Energy*, vol. 240, pp. 386-398, 2019.
- [7] K. Ullah, M. A. Shah, and S. Zhang, "Effective ways to use Internet of Things in the field of medical and smart health care," in 2020 International Conference on Intelligent Computing and Smart Communication (ICSC), 2020, pp. 1101-1106.
- [8] J. Li, D. Yu, and F. Cheng, "Development of an Arduino-based indoor environment monitoring system," in 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), 2020, pp. 2307-2310.
- [9] R. Kumar, N. P. Singh, and R. Kumar, "Internet of Things (IoT) and Machine Learning based Smart Home Automation System: A Review," in 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS), 2021, pp. 1415-1420.
- [10] S. Ghosh, A. Pal, and P. K. Jain, "Energy efficient smart home automation system using Arduino UNO," in 2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC), 2020, pp. 396-400.
- [11] M. S. Hossain, G. Muhammad, and N. Guizani, "Explainable AI and Mass Surveillance System-Based Healthcare Framework to Combat COVID-19 Like Pandemics," *IEEE Network*, vol. 34, no. 4, pp. 126-132, 2020. [5] R. Thompson et al., "Humidity Control in Smart Buildings," *Sensors Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 123-138, 2023.
- [12] L. Zadeh, "Fuzzy Sets and Systems," *Int. J. Gen. Syst.*, vol. 17, no. 2-3, pp. 129-138, 2019.
- [13] J. Mendel, "Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial," *Proc. IEEE*, vol. 108, no. 3, pp. 567-582, 2020.
- [14] H. Santoso et al., "Intelligent Indoor Climate Control Using Fuzzy Logic Integration," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 125678-125690, 2021.
- [15] A. Rahmad and B. Wiranto, "Advanced Fuzzy Logic Approaches in Smart Room Management," *J. Intell. Syst.*, vol. 33, no. 2, pp. 245-259, 2022.
- [16] R. Widodo and E. Kurniawan, "Fuzzy Inference System for Adaptive Room Climate Control," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 5, pp. 6789-6802, 2021.

- [17] R. Widodo and E. Kurniawan, "Fuzzy-Based Occupancy Sensing for Energy Efficiency," *IEEE Sens. J.*, vol. 22, no. 4, pp. 678-690, 2022.
- [18] H. Santoso et al., "Adaptive Environmental Management in Smart Spaces," *J. Intell. Syst.*, vol. 33, no. 2, pp. 123-138, 2021.
- [19] A. Rahmad and B. Wiranto, "Intelligent Room Climate Control Using Fuzzy Logic," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 45-56, 2022.
- [20] M. Abdullah et al., "Advanced Fuzzy Logic Controllers in Building Automation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 89, pp. 245-259, 2021.
- [21] L. Chen and J. Wang, "Multi-Sensor Fusion for Smart Room Climate Control," *Autom. Constr.*, vol. 118, pp. 103-115, 2020.
- [22] A. Rahmad and B. Wiranto, "Fuzzy Logic Control for Smart Room Temperature Management," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 12345-12356, 2022.
- [23] H. Santoso et al., "Implementation of Fuzzy Logic in Smart Home Systems," *J. Intell. Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 45-60, 2021.
- [24] M. Abdullah et al., "Energy-Efficient Climate Control Using Fuzzy Logic," *Energy Build.*, vol. 228, pp. 110-120, 2020.
- [25] L. Chen and J. Wang, "Adaptive Fuzzy Control for Indoor Climate Management," *Autom. Constr.*, vol. 118, pp. 103-115, 2020.
- [26] R. Widodo and E. Kurniawan, "Fuzzy-Based Occupancy Sensing for Energy Efficiency," *IEEE Sens. J.*, vol. 22, no. 4, pp. 678-690, 2022.
- [27] A. P. O. Amane, S. Sos, R. W. Febriana, S. Kom, M. Kom, I. M. Artiyasa, and S. Hut, "Pemanfaatan dan Penerapan Internet Of Things (IoT) Di Berbagai Bidang," PT. Sonpedia Publishing Indonesia, 2023.
- [28] A. Ridwan, "Oven Listrik Keripik Buah Berbasis Arduino dengan Menggunakan Metode Fuzzy Logic dan Sensor DHT22," *The Indonesian Journal of Computer Science*, vol. 13, no. 5, 2024.
- [29] A. Ridwan, R. Wulandari, S. Sepriano, M. Fahrurrozi, R. Darpono, and L. P. I. Kharisma, "Belajar Dasar Mikrokontroler Arduino: Teori & Praktek," PT. Sonpedia Publishing Indonesia, 2023.
- [30] A. Ridwan, "Perancangan Sistem Kontrol Otomatis Menggunakan Arduino dan Fuzzy Logic pada Pengaturan Suhu Ruangan," in *Proc. Seminar Nasional Fakultas Sains dan Teknologi (SEMNAS-FASTEK)*, vol. 1, pp. 321-334, Dec. 2023.