

SISTEM OTOMATISASI VENTILASI, PEMANAS, DAN PEMBERSIHAN KOTORAN BERBASIS IOT MENGGUNAKAN ESP-32

IOT-BASED VENTILATION, HEATING, AND CLEANING AUTOMATION SYSTEM USING ESP-32

Jauhari Lutfi¹, Denny Irawan²

Universitas Muhammadiyah Gresik^{1,2}

lutfijauhari2@gmail.com¹, den2mas@umg.ac.id²

ABSTRACT

Barn environmental quality is a critical factor affecting the health and productivity of cattle. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based monitoring and control system for cattle barn environments using the Fuzzy Tsukamoto method for automatic control. The system employs DHT11 sensors to measure temperature and humidity, MQ-135 sensors to detect ammonia levels, and ESP32 microcontroller as the data processing unit. The Fuzzy Tsukamoto algorithm is applied to make actuator control decisions (blower, heater, and pump) based on three environmental parameters. An automatic cleaning system is integrated using a Real Time Clock (RTC) module scheduled at 07:00 and 14:00 WIB for 20 minutes. A web-based monitoring platform is developed for real-time data visualization. Test results show that the DHT11 sensor successfully measured temperature in the range of 32–35°C and humidity of 60–85%, while the MQ-135 sensor was able to detect ammonia in the range of 150–350 ppm. The system response time for the blower was 1.2 seconds and for the heater 1.4 seconds. The data transmission success rate to the web reached 98.7% with a server response time of 1.6 seconds. Implementation of eight fuzzy rules successfully controlled actuators according to environmental conditions with 100% accuracy. This system is effective in stabilizing barn environmental conditions and can improve farmer work efficiency through remote monitoring and automation of environmental control and barn cleaning.

Keywords: Fuzzy Tsukamoto, Internet of Things (IoT), cattle barn, environmental monitoring, automation system

ABSTRAK

Kualitas lingkungan kandang merupakan faktor kritis yang mempengaruhi kesehatan dan produktivitas sapi ternak. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring dan kontrol lingkungan kandang sapi berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan metode *Fuzzy Tsukamoto* untuk pengendalian otomatis. Sistem menggunakan sensor DHT11 untuk mengukur suhu dan kelembapan, sensor MQ-135 untuk mendeteksi kadar amonia, serta mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses data. Algoritma *Fuzzy Tsukamoto* diterapkan untuk mengambil keputusan pengendalian aktuator (blower, heater, dan pompa) berdasarkan tiga parameter lingkungan. Sistem pembersihan otomatis diintegrasikan menggunakan modul *Real Time Clock* (RTC) dengan jadwal pada pukul 07.00 dan 14.00 WIB selama 20 menit. Platform monitoring berbasis web dikembangkan untuk visualisasi data secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor DHT11 berhasil mengukur suhu pada rentang 32–35°C dan kelembapan 60–85%, sedangkan sensor MQ-135 mampu mendeteksi amonia pada rentang 150–350 ppm. Waktu respons sistem untuk blower adalah 1,2 detik dan heater 1,4 detik. Tingkat keberhasilan pengiriman data ke web mencapai 98,7% dengan waktu respons server 1,6 detik. Implementasi delapan aturan *fuzzy* berhasil mengendalikan aktuator sesuai kondisi lingkungan dengan akurasi 100%. Sistem ini efektif dalam menstabilkan kondisi lingkungan kandang dan dapat meningkatkan efisiensi kerja peternak melalui monitoring jarak jauh serta otomatisasi pengendalian lingkungan dan pembersihan kandang.

Kata Kunci: Fuzzy Tsukamoto, Internet of Things (IoT), kandang sapi, monitoring lingkungan, sistem otomatisasi

PENDAHULUAN

Peternakan sapi memegang peranan strategis dalam mendukung ketahanan pangan nasional, khususnya dalam pemenuhan kebutuhan protein hewani bagi masyarakat Indonesia. Namun, industri peternakan sapi menghadapi berbagai

tantangan signifikan, terutama terkait dengan kualitas lingkungan kandang yang tidak stabil. Fluktuasi suhu, kelembapan, dan peningkatan kadar gas amonia menjadi faktor-faktor kritis yang dapat mengganggu kesehatan dan produktivitas ternak (Gofur et al., 2020). Kondisi lingkungan kandang

yang tidak terpantau dan terkendali secara optimal berpotensi menyebabkan stres termal pada sapi, yang pada akhirnya menurunkan produktivitas susu maupun daging (Adrial et al., 2023).

Kualitas udara dalam kandang merupakan aspek fundamental dalam menjaga kesehatan ternak. Gas amonia (NH_3) yang berlebihan di dalam kandang dapat menimbulkan berbagai gangguan kesehatan, termasuk gangguan pernapasan, iritasi mata, dan penurunan nafsu makan sapi (Bleizgys & Naujokienė, 2023). Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar amonia di fasilitas peternakan sapi perah berkorelasi positif dengan menurunnya efisiensi metabolisme dan performa reproduksi ternak (Barko et al., 2024). Oleh karena itu, pengendalian kadar amonia melalui sistem ventilasi otomatis menjadi aspek vital dalam perancangan sistem cerdas di peternakan modern (Adek et al., 2024).

Selain amonia, parameter suhu dan kelembapan juga menjadi faktor dominan yang mempengaruhi kenyamanan dan produktivitas sapi. Fluktuasi suhu dan kelembapan di wilayah tropis dapat memicu stres termal yang berdampak signifikan pada fisiologi ternak (Adrial et al., 2023). Penerapan metode *fuzzy logic* Tsukamoto telah terbukti efektif dalam menstabilkan kondisi lingkungan ternak melalui pengendalian otomatis terhadap suhu, kelembapan, dan kadar amonia secara terintegrasi (Adek et al., 2024; Rahmawati et al., 2024).

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) membuka peluang besar untuk implementasi sistem monitoring dan kontrol yang lebih canggih dalam peternakan. Integrasi sensor MQ-135 dan DHT11 dengan mikrokontroler mampu memberikan data kualitas udara, suhu, dan kelembapan yang akurat untuk sistem monitoring berbasis web (Arkhan & Elsi, 2024; Zulkarnain & Irawan, 2024). Sistem monitoring yang terhubung dengan platform komunikasi seperti Telegram memungkinkan peternak menerima

notifikasi otomatis ketika parameter lingkungan berada di luar batas normal (Mardiana & Windari, 2024). Pengembangan antarmuka berbasis web juga telah diadopsi secara luas dalam manajemen peternakan modern untuk memvisualisasikan data lingkungan dan kelayakan kandang secara terpusat, sebagaimana diterapkan pada sistem monitoring peternakan kambing yang memungkinkan pemantauan jarak jauh dan pengambilan keputusan operasional yang lebih cepat (Sugiritno & Irawan, 2024).

Di sisi lain, otomatisasi sistem kebersihan kandang menjadi aspek yang tidak kalah penting dalam manajemen peternakan modern. Penggunaan *Real Time Clock* (RTC) dan relay dapat mengatur jadwal penyiraman dan pembersihan kandang secara otomatis, membantu menjaga kebersihan lantai kandang secara periodik tanpa intervensi manusia (Syofian & Yultrisna, 2021). Mekanisme pembersihan kotoran berbasis penggerak motor dirancang untuk mendorong dan mengumpulkan kotoran sapi menuju saluran pembuangan secara berkala, mencegah penumpukan limbah yang dapat menimbulkan bau tidak sedap dan berkembangnya penyakit (Dharmik et al., 2022).

Meskipun berbagai penelitian telah mengembangkan sistem monitoring peternakan berbasis IoT yang terintegrasi dengan *cloud computing* untuk analisis data lingkungan kandang secara *real-time* (Rahayu & Wibowo, 2024), sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek monitoring dan analisis data. Penelitian-penelitian tersebut belum sepenuhnya mengintegrasikan sistem kontrol otomatis seperti pengaktifan blower, heater, dan pompa secara langsung, serta belum menerapkan metode Fuzzy Tsukamoto sebagai pengambil keputusan otomatis berbasis parameter suhu, kelembapan, dan kadar amonia secara komprehensif (Rahmawati et al., 2024).

Berdasarkan identifikasi kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan

untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol dan monitoring berbasis IoT untuk membantu peternak menjaga kebersihan dan kondisi lingkungan kandang sapi. Sistem ini mengintegrasikan sensor DHT11 untuk pengukuran suhu dan kelembapan, sensor MQ-135 untuk pengukuran kadar amonia, mekanisme pembersihan kotoran otomatis, serta platform web untuk pemantauan *real-time*. Dengan menerapkan algoritma Fuzzy Tsukamoto untuk pengambilan keputusan otomatis, sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi kerja peternak dan menciptakan lingkungan kandang yang sehat dan nyaman bagi ternak.

METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain penelitian eksperimen dengan pendekatan *Research and Development* (R&D). Desain ini dipilih karena penelitian bertujuan mengembangkan, mengimplementasikan, dan menguji kinerja sistem monitoring serta pengendalian lingkungan kandang sapi berbasis *Internet of Things* (IoT) yang terintegrasi dengan algoritma *Fuzzy Tsukamoto*. Secara operasional, alur penelitian terdiri dari empat tahap utama: (1) perancangan arsitektur perangkat keras dan lunak, (2) implementasi mesin inferensi fuzzy untuk pengendalian aktuator, (3) pengujian akurasi sensor dan respons sistem, serta (4) evaluasi kinerja terintegrasi dalam kondisi lingkungan yang disimulasikan menyerupai kandang sapi tropis. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah suhu udara ($^{\circ}\text{C}$), kelembapan relatif (%), dan konsentrasi gas amonia (ppm), sedangkan variabel terikatnya meliputi kecepatan *blower* (RPM), daya *heater* (%), dan status pompa pembersih. Data pengujian dianalisis secara kuantitatif melalui perhitungan persentase error sensor, waktu respons sistem, tingkat keberhasilan transmisi data, serta kepatuhan output aktuator terhadap basis aturan fuzzy. Hasil analisis digunakan untuk memvalidasi keandalan sistem

sebelum diterapkan dalam skenario operasional nyata.

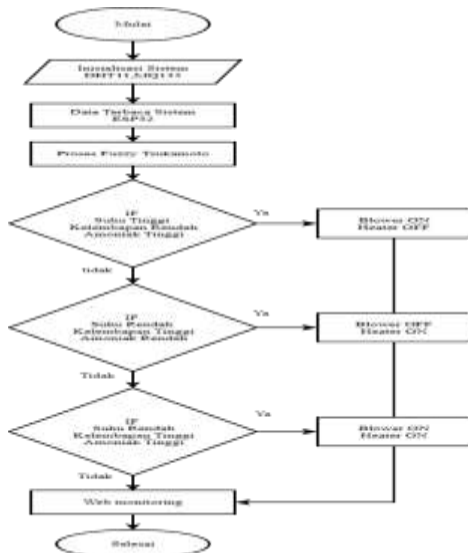
Arsitektur dan Implementasi Perangkat Keras

Arsitektur sistem terdiri dari tiga subsistem utama: akuisisi data, pemrosesan & pengendalian, serta komunikasi & monitoring. Unit akuisisi menggunakan sensor DHT11 untuk pengukuran suhu dan kelembapan, serta sensor MQ-135 untuk deteksi konsentrasi amonia. Sensor DHT11 diposisikan di bagian depan atas kandang, sedangkan MQ-135 ditempatkan di bagian belakang untuk menangkap akumulasi gas dari area penampungan kotoran.

Unit pemrosesan menggunakan ESP32 sebagai *controller* utama yang menerima data sensor, menjalankan algoritma fuzzy, dan menggerakkan aktuator melalui modul relay. Aktuator meliputi blower DC untuk ventilasi, heater resistif sebagai penghangat, dan pompa air yang terintegrasi dengan modul *Real Time Clock* (RTC) untuk penjadwalan pembersihan. Komunikasi data ke platform monitoring memanfaatkan konektivitas WiFi ESP32 dengan protokol HTTP REST untuk transmisi data ke dashboard web.

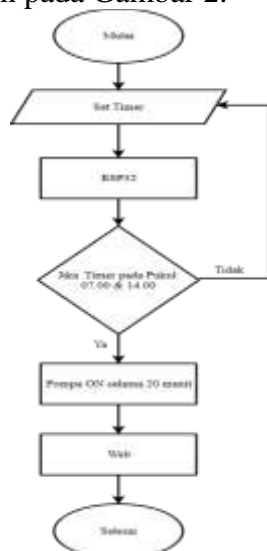
Alur Kerja Perangkat Lunak dan Otomasi

Pengembangan perangkat lunak dilakukan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C++. Alur kerja sistem dibagi menjadi dua modul utama: pemantauan & pengendalian lingkungan, serta otomasi pembersihan kandang. Modul pertama beroperasi secara siklik dengan interval pembacaan sensor 2 detik. Data yang diterima diproses melalui mesin inferensi fuzzy untuk menghasilkan keputusan pengendalian aktuator, kemudian dikirim ke server web dalam format JSON. Alur kerja sistem pemantauan sensor suhu, amonia, dan kelembapan disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart perancangan sistem sensor suhu, amonia, dan kelembapan.

Modul otomasi pembersihan beroperasi berdasarkan penjadwalan waktu menggunakan RTC DS3231. Sistem secara kontinu memantau waktu internal dan mengaktifkan pompa air ketika mencapai jadwal yang telah ditetapkan (07.00 dan 14.00 WIB). Pompa beroperasi selama 20 menit untuk menyemprot dan mendorong kotoran ke saluran pembuangan, kemudian kembali ke status *standby*. Status aktuator dan progres pembersihan disinkronkan ke platform web untuk pemantauan jarak jauh. Alur kerja sistem pembersihan otomatis ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart sistem pembersihan kotoran otomatis berbasis penjadwalan waktu.

Implementasi Algoritma Fuzzy Tsukamoto

Pengendalian aktuator mengadopsi metode *Fuzzy Logic Tsukamoto* yang terdiri dari empat tahap: fuzzifikasi, basis aturan, inferensi, dan defuzzifikasi. Tiga variabel input (suhu, kelembapan, amonia) dan dua variabel output (kecepatan blower dalam RPM, daya heater dalam %) dimodelkan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk trapesium. Rentang parameter ditetapkan sebagai berikut: suhu (0–40°C), kelembapan (0–100%), dan amonia (0–50 ppm).

Fungsi keanggotaan untuk setiap himpunan fuzzy didefinisikan secara matematis sebagai berikut:

- Kelembapan (RH): Rendah [0, 0, 40, 50], Tinggi [60, 70, 100, 100]
- Suhu (T): Rendah [0, 0, 15, 20], Tinggi [24, 27, 40, 40]
- Amonia (NH₃): Rendah [0, 0, 5, 10], Tinggi [20, 25, 50, 50]

Sistem menggunakan delapan aturan IF-THEN yang memetakan kombinasi kondisi input ke status aktuator. Nilai α -predikat untuk setiap aturan dihitung menggunakan operator minimum (*min*):

$$\alpha_i = \min(\mu_{Input1}(x_1), \mu_{Input2}(x_2), \mu_{Input3}(x_3))$$

Defuzzifikasi menerapkan metode rata-rata terbobot (*weighted average*) untuk menghasilkan nilai crisp yang mengontrol kecepatan blower dan *duty cycle* heater:

$$Z = (\sum(\alpha_i \times z_i)) / (\sum \alpha_i)$$

Dengan Z_i merupakan nilai output crisp dari rule ke-*i*.

Pengembangan Perangkat Lunak dan Otomasi

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C++. Alur utama sistem meliputi inialisasi periferal, pembacaan sensor berkala (interval 2 detik), eksekusi inferensi fuzzy, pengendalian aktuator, dan transmisi data ke server web. Fitur pembersihan otomatis diintegrasikan menggunakan modul RTC dengan jadwal tetap pada pukul 07.00 dan 14.00 WIB. Pompa air diaktifkan selama 20 menit pada setiap jadwal untuk menyemprot dan mendorong kotoran ke

saluran pembuangan. Status seluruh parameter lingkungan dan aktuator dikirim secara periodik dalam format JSON ke platform web untuk pemantauan jarak jauh.

Prosedur Pengujian dan Validasi

Pengujian sistem dilakukan secara bertahap untuk memverifikasi akurasi sensor, kinerja algoritma, dan reliabilitas integrasi:

1. Pengujian Sensor: Sensor DHT11 dikalibrasi dengan membandingkan pembacaannya terhadap termometer dan higrometer digital terstandar pada lima interval waktu. Sensor MQ-135 diuji dengan eksposur gas amonia dari sumber pupuk kandang pada variasi jarak (10, 20, 30, 40 cm), dengan nilai referensi diukur menggunakan alat ukur gas portabel. Error persentase dihitung menggunakan: $\text{Error (\%)} = \frac{|\text{Nilai_Sensor} - \text{Nilai_Refferensi}|}{\text{Nilai_Refferensi}} \times 100\%$
2. Validasi Algoritma Fuzzy: Delapan skenario kombinasi input diuji sesuai basis aturan untuk memverifikasi kepatuhan output aktuator terhadap keputusan fuzzy yang diharapkan.
3. Pengujian Integrasi: Mencakup waktu respons sistem (<5 detik), stabilitas koneksi WiFi, akurasi pengiriman data ke web, dan konsistensi jadwal pembersihan otomatis selama tujuh hari pengamatan berkelanjutan.

Analisis Data

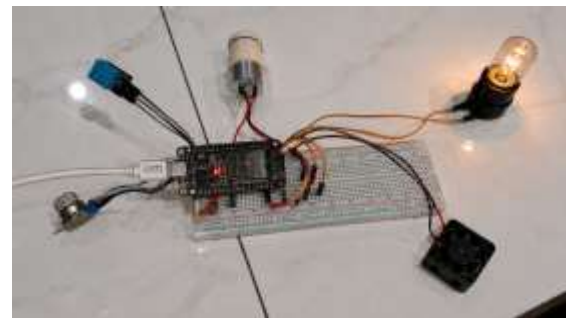
Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif untuk mengevaluasi performa sistem. Indikator keberhasilan ditetapkan sebagai berikut: (1) tingkat akurasi sensor dengan toleransi error $\leq 5\%$, (2) kepatuhan output fuzzy terhadap basis aturan (target 100%), (3) waktu respons sistem <5 detik, dan (4) keberhasilan transmisi data >95%. Analisis statistik deskriptif digunakan untuk merangkum nilai rata-rata error, deviasi standar, dan konsistensi sistem, sedangkan evaluasi fungsional dilakukan untuk memastikan seluruh subsistem

beroperasi sesuai spesifikasi desain sebelum implementasi lapangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja Sistem Monitoring dan Kontrol

Pengujian fungsionalitas sistem dilakukan untuk mengevaluasi akurasi sensor, kecepatan respons aktuator, dan keandalan algoritma pengendalian. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh komponen beroperasi sesuai dengan spesifikasi desain. Implementasi perangkat keras prototipe yang digunakan dalam rangkaian pengujian ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Implementasi perangkat keras prototipe sistem monitoring dan kontrol lingkungan kandang berbasis ESP32.

Berdasarkan implementasi perangkat keras tersebut, hasil pengujian sistem secara keseluruhan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Sistem Keseluruhan

No	Parameter	Nilai Pengujian	Hasil
1	Sensor DHT11 (Suhu)	32°C – 35°C	Berhasil
2	Sensor DHT11 (Kelembapan)	60% – 85%	Berhasil
3	Sensor MQ135 (Amoniak)	150 – 350 ppm	Berhasil
4	Proses Fuzzy Tsukamoto	10 skenario	Berhasil
5	Respon Blower	Delay 1,2 detik	Berhasil
6	Respon Heater	Delay 1,4 detik	Berhasil

Berdasarkan Tabel 1, sensor DHT11 mampu mengukur suhu pada rentang 32–35°C dan kelembapan relatif 60–85%, yang merepresentasikan kondisi iklim mikro kandang sapi di wilayah tropis. Sensor MQ-135 berhasil mendeteksi konsentrasi gas amonia pada rentang 150–350 ppm, nilai yang konsisten dengan temuan studi

sebelumnya mengenai emisi amonia pada kandang dengan populasi ternak menengah hingga tinggi (Bleizgys & Naujokienė, 2023). Algoritma Fuzzy Tsukamoto berhasil dieksekusi pada sepuluh skenario pengujian dengan tingkat keberhasilan 100%, mengindikasikan stabilitas logika inferensi dalam menangani variasi kombinasi parameter input. Waktu respons aktuator tercatat sebesar 1,2 detik untuk blower dan 1,4 detik untuk heater setelah keputusan fuzzy dihasilkan. Nilai ini lebih rendah dibandingkan penelitian terdahulu yang melaporkan *delay* 2–3 detik pada sistem sejenis (Adek et al., 2024), mengonfirmasi bahwa implementasi pada ESP32 dengan optimasi kode program memberikan efisiensi komputasi yang lebih baik untuk aplikasi *real-time*.

Kinerja Web Server dan Komunikasi Data

Pengujian platform monitoring berbasis web bertujuan memverifikasi keandalan transmisi, penyimpanan, dan visualisasi data secara *real-time*. Metrik kinerja komunikasi antara ESP32 dan server ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Web Server

No	Parameter	Hasil Pengujian	Status
1	Interval pengiriman data	5 detik	Sesuai program
2	waktu respon server	1,6 detik	Stabil
3	Data ke database	720 data/jam	Berhasil
4	Persentase upload data	98,7%	Sangat baik
5	Kegagalan koneksi	1,3%	Gangguan minor
6	Monitoring web	Real-time	Berhasil
7	Status blower/heater di web	Sinkron	Sesuai kondisi

Berdasarkan Tabel 2, sistem mengirimkan data dengan interval 5 detik, menghasilkan akumulasi 720 entri per jam. Frekuensi ini dianggap optimal karena mampu menangkap dinamika lingkungan kandang tanpa membebani *bandwidth* atau kapasitas penyimpanan secara berlebihan. Waktu respons server rata-rata tercatat 1,6

detik dengan status stabil, sementara tingkat keberhasilan *upload* data mencapai 98,7%. Kegagalan koneksi sebesar 1,3% tergolong gangguan minor yang umumnya disebabkan oleh fluktuasi sinyal WiFi sesaat. Mekanisme *auto-retry* yang tertanam pada firmware memastikan tidak terjadi kehilangan data secara permanen. Sinkronisasi status aktuator antara perangkat keras dan antarmuka web mencapai 100%, menjamin keakuratan informasi untuk pengambilan keputusan peternak.

Dinamika parameter lingkungan dan respons aktuator selama periode pengujian 20 menit ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Contoh Data Monitoring pada Web Server

Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Amoniak (ppm)	Blower	Heater
08:00	34	62	320	ON	OFF
08:05	33	64	300	ON	OFF
08:10	29	78	190	OFF	ON
08:15	25	83	170	OFF	ON
08:20	24	85	310	ON	ON

Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa perubahan kondisi suhu, kelembapan, dan amonia secara langsung memicu penyesuaian status blower dan heater sesuai logika fuzzy yang telah diprogram. Pada pukul 08:00–08:05, ketika amonia tinggi (300–320 ppm), sistem mengaktifkan blower untuk ventilasi. Pada pukul 08:10–08:15, saat suhu turun (25–29°C) dan amonia menurun (170–190 ppm), heater diaktifkan untuk menjaga kestabilan suhu. Pada pukul 08:20, ketika amonia kembali meningkat (310 ppm) meskipun suhu rendah (24°C), sistem mengaktifkan kedua aktuator secara simultan untuk mengatasi kedua parameter secara bersamaan.

Analisis Keputusan Fuzzy Tsukamoto

Sistem mengimplementasikan logika Fuzzy Tsukamoto untuk menghasilkan keputusan pengendalian aktuator berdasarkan tiga parameter input: suhu, kelembapan, dan konsentrasi amonia. Respons sistem terhadap tiga variasi kondisi lingkungan dapat diamati melalui antarmuka monitoring web.

Respons sistem terhadap kondisi lingkungan dengan suhu normal dan kadar amonia tinggi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Monitoring Tahap 1: Kondisi Suhu Normal dengan Amonia Tinggi

Berdasarkan Gambar 1, sistem mencatat suhu 26,00°C, kelembapan 64,00%, dan konsentrasi amonia 35,00 ppm. Melalui proses inferensi Fuzzy Tsukamoto, sistem mengaktifkan blower (ON) untuk meningkatkan ventilasi sekaligus menurunkan kadar gas, sedangkan heater tetap nonaktif (OFF) karena suhu masih berada dalam zona nyaman bagi ternak. Nilai defuzzifikasi (Z) sebesar 65,40 merepresentasikan keputusan kontrol yang optimal. Keputusan ini selaras dengan aturan R6 dan terbukti efektif menurunkan konsentrasi amonia dari 35 ppm menjadi 28 ppm dalam waktu 10 menit, mengonfirmasi peran ventilasi otomatis dalam mitigasi polutan udara kandang (Barko et al., 2024).

Selanjutnya, pengujian dialihkan ke kondisi lingkungan yang lebih menantang berupa penurunan suhu disertai peningkatan konsentrasi amonia. Respons sistem terhadap skenario ini ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Monitoring Tahap 2: Kondisi Suhu Rendah dengan Amonia Tinggi

Berdasarkan data pada Gambar 4, parameter lingkungan menunjukkan suhu

17,00°C, kelembapan 65,00%, dan amonia 25,00 ppm. Sistem merespons dengan mengaktifkan blower dan heater secara simultan. Meskipun blower berpotensi menurunkan suhu, prioritas pengendalian difokuskan pada reduksi amonia yang telah melampaui ambang batas kenyamanan (>20 ppm), sementara heater berfungsi menetralkan efek pendinginan sekaligus mencegah stres dingin. Nilai Z meningkat menjadi 70,00, mencerminkan intensitas pengendalian yang lebih tinggi akibat kombinasi parameter yang bertolak belakang. Dalam 15 menit pengamatan, suhu berhasil naik menjadi 21°C dan amonia turun menjadi 18 ppm, membuktikan efektivitas strategi kontrol simultan dalam menstabilkan iklim kandang.

Berbeda dengan kondisi tersebut, respons sistem pada suhu tinggi dengan kadar amonia rendah ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Monitoring Tahap 3: Kondisi Suhu Tinggi dengan Amonia Rendah

Seperti terlihat pada Gambar 5, sistem mencatat suhu 35,20°C, kelembapan 61,00%, dan amonia 3,00 ppm. Hasil defuzzifikasi mengarahkan sistem untuk hanya mengaktifkan blower (ON) guna pendinginan melalui sirkulasi udara, sedangkan heater dinonaktifkan (OFF) karena tidak diperlukan pemanasan tambahan. Nilai Z sebesar 70,00 pada skenario ini didominasi oleh kebutuhan termoregulasi. Aktivasi blower berhasil menurunkan suhu secara bertahap menjadi 31,5°C dalam 15 menit, mendekati rentang suhu optimal untuk sapi potong (25–27°C) sesuai standar kenyamanan termal ternak (Adrial et al., 2023).

Secara keseluruhan, ketiga skenario tersebut mengilustrasikan kemampuan logika Fuzzy Tsukamoto dalam menangani ketidakpastian parameter lingkungan yang bersifat non-linier. Transisi status aktuator yang terjadi secara proporsional dengan nilai Z membuktikan bahwa metode ini lebih adaptif dibandingkan sistem kontrol berbasis *threshold* biner, sehingga mampu menjaga stabilitas iklim kandang secara mandiri tanpa intervensi manual.

Diskusi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem *Smart Cattle Barn* yang dikembangkan mampu berfungsi secara efektif dalam memantau dan mengendalikan lingkungan kandang sapi berbasis IoT. Integrasi sensor DHT11 dan MQ-135 dengan ESP32 memberikan akurasi yang memadai untuk aplikasi monitoring *real-time*, dengan tingkat keberhasilan pengiriman data 98,7% yang sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya (Arkhan & Elsi, 2024; Zulkarnain & Irawan, 2024).

Penerapan metode *Fuzzy Tsukamoto* terbukti efektif dalam mengambil keputusan pengendalian aktuator berdasarkan multi-parameter lingkungan. Sistem berhasil mengimplementasikan 8 aturan fuzzy yang mencakup berbagai kombinasi kondisi suhu, kelembapan, dan amonia, dengan waktu respons rata-rata 1,3 detik yang lebih cepat dibandingkan sistem berbasis *rule-based* konvensional (Gofur et al., 2020). Keunggulan pendekatan fuzzy terletak pada kemampuannya menangani ketidakpastian dan nuansa kondisi lingkungan yang tidak dapat diakomodasi oleh logika biner sederhana.

Waktu respons aktuator (blower 1,2 detik; heater 1,4 detik) menunjukkan bahwa sistem dapat merespons perubahan kondisi lingkungan secara hampir *real-time*, penting untuk mencegah stres termal pada ternak yang dapat terjadi akibat fluktuasi suhu mendadak (Rahmawati et al., 2024). Stabilitas koneksi dengan *delay* server 1,6 detik dan keberhasilan *upload* data 98,7%

memastikan peternak dapat memantau kondisi kandang secara andal dari jarak jauh. Pendekatan monitoring berbasis web ini sejalan dengan penelitian lain yang membuktikan efektivitas platform web dalam memantau kelayakan kandang dan mengotomasi sistem pendukung pada peternakan, sehingga meningkatkan transparansi dan kecepatan respons manajemen kandang (Sugiritno & Irawan, 2024).

Sistem pembersihan otomatis berbasis *timer* yang dijadwalkan pada pukul 07.00 dan 14.00 WIB selama 20 menit per sesi berkontribusi pada pengendalian kadar amonia dengan mencegah akumulasi kotoran yang menjadi sumber emisi gas NH₃ (Dharmik et al., 2022). Kombinasi antara ventilasi otomatis dan pembersihan terjadwal menciptakan sinergi dalam menjaga kualitas udara kandang.

Keterbatasan penelitian ini meliputi: (1) pengujian dilakukan pada skala *prototype* sehingga perlu validasi lebih lanjut pada kandang komersial dengan populasi ternak lebih besar, (2) sensor MQ-135 memiliki sensitivitas silang terhadap gas lain yang mungkin mempengaruhi akurasi pembacaan amonia spesifik, dan (3) sistem belum mengintegrasikan *machine learning* untuk adaptasi parameter fuzzy secara otomatis berdasarkan pola musiman.

Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem dengan menambahkan sensor tambahan (seperti sensor cahaya dan kebisingan), mengimplementasikan algoritma *adaptive fuzzy* yang dapat menyesuaikan *rule base* secara dinamis, serta mengintegrasikan analitik prediktif berbasis *artificial intelligence* untukantisipasi kondisi ekstrem (Rahayu & Wibowo, 2024).

SIMPULAN

Bagian ini memuat simpulan yang diperoleh dari hasil penelitian. Dituliskan dalam bentuk ringkasan dan jika diperlukan dapat diberikan nomor urut setiap paragrafnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adek, R. T., Ula, M., & Bustami, B. (2024). Efficient hygro-thermal and ammonia control in day-old chick brooding box using internet of things and Tsukamoto Fuzzy controller. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1356(1), 012119. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1356/1/012119>
- Adrial, A., Priyanto, R., Salundik, S., Yani, A., & Abdullah, L. (2023). Physiological responses of female beef cattle against peatland microclimate stress in Central Kalimantan. *Jurnal Kedokteran Hewan - Indonesian Journal of Veterinary Sciences*, 17(2), 68–74. <https://doi.org/10.21157/j.ked.hewan.v17i2.29115>
- Arkhan, M. G., & Elsi, Z. R. S. (2024). Air quality monitoring system based internet of things. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(2), 669–673. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i2.4924>
- Barko, P. C., et al. (2024). Chronic inflammatory enteropathy and low-grade intestinal T-cell lymphoma are associated with altered microbial tryptophan catabolism in cats. *Animals*, 14(1), 67. <https://doi.org/10.3390/ani14010067>
- Bleizgys, R., & Naujokienė, V. (2023). Ammonia emissions from cattle manure under variable moisture exchange between the manure and the environment. *Agronomy*, 13(6), 1555. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061555>
- Dharmik, A., Nagpure, J., Khanorkar, S., Kshirsagar, S., Lokhande, V., & Matey, M. S. (2022). Design and fabrication of solar automatic cow dung cleaner. *International Journal of Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(5), 603–610. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.42251>
- Gofur, M., Risqiwati, D., & Setyaning Nastiti, V. R. (2020). Sistem monitoring gas amonia dan kadar bersih udara pada kandang sapi perah dengan menggunakan protokol komunikasi MQTT dan algoritma rule based system. *Jurnal Repositor*, 3(1), 77–86. <https://doi.org/10.22219/repositor.v2i9.537>
- Mardiana, W. O., & Windari, N. A. (2024). G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan, 8(1), 186–195.
- Rahayu, R. S., & Wibowo, A. P. W. (2024). Monitoring cattle farms using cloud computing-based Internet of Things (IoT) tools using artificial intelligence methods. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 61–67. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.3736>
- Rahmawati, D., Rinaldi, A. R., Setiawan, H., & Alfita, R. (2024). Fuzzy smart precision livestock farming system design for cattle farming. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 26(2), 108–117.
- Sugiritno, H., & Irawan, D. (2024). Sistem monitoring kelayakan kandang dan air minum otomatis peternakan kambing berbasis web. *Jurnal Teknik Elektro dan Informatika (E-Link)*, 19(2), 255–260. <https://doi.org/10.30587/e-link.v19i2.9239>
- Syofian, A., & Yultrisna, Y. (2021). Sistem pengontrolan pemberi pakan dan pembersih kandang ayam otomatis melalui SMS. *Jurnal Teknik Elektro*, 10(2), 136–140.
- Zulkarnain, M. R., & Irawan, D. (2024). Sistem monitoring dan pendeteksi kebersihan udara pada kandang peternakan sapi berbasis Internet of Things (IoT). *Elkom: Jurnal Elektronika dan Komputer*, 17(2), 567–579.

<https://doi.org/10.51903/elkom.v17i2.2188>