



SISTEM MONITORING DAN KONTROL KANDANG KUCING
BERBULU PANJANG BERBASIS IOT
DENGAN FUZZY LOGIC

Mizaell Manusiwa^{1*}, Suryo Adi Wibowo², Deddy Rudhistiar³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Informatika S1, Institut Teknologi Nasional Malang

email: mizaellmanusiwa@gmail.com^{1*}

Abstrak: Kucing berbulu panjang seperti Persia membutuhkan lingkungan kandang dengan suhu dan kelembapan yang stabil agar tetap sehat dan terhindar dari stres panas. Namun, fluktuasi suhu ruangan dan aktivitas pemilik yang padat sering menyebabkan kondisi kandang tidak terpantau secara optimal. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring dan kontrol otomatis berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan metode Fuzzy Logic Mamdani untuk menjaga kestabilan suhu dan kelembapan kandang kucing berbulu panjang. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan sensor DHT22, MQ-135, sensor level air, dan load cell, serta aktuator berupa kipas DC, heater keramik, dan humidifier. Algoritma fuzzy Mamdani mengatur kecepatan kipas melalui PWM serta durasi aktif heater dan humidifier menggunakan metode time-slice control. Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu berhasil turun dari 28,8 °C menjadi 27,4 °C dan kelembapan menurun dari 71,2 %RH menjadi 67,5 %RH dalam waktu 20 menit. Sistem memiliki rata-rata delay pengiriman data 500–1000 ms dan menampilkan data sensor, status aktuator, serta streaming kamera secara real-time. Sistem terbukti mampu menjaga kondisi mikroklimat dalam rentang nyaman 15,5–26 °C dan 30–70 %RH secara efisien.

Kata Kunci : Esp32, Fuzzy Logic, Internet Of Things, Kucing Berbulu Panjang

PENDAHULUAN

Kucing Persia makin digemari di Indonesia [1][2]. Tapi, merawat mereka tidak sesederhana kelihatannya. Bulunya yang tebal membuat mereka mudah kepanasan atau kedinginan jika cuaca berubah [3]. Cuaca panas bisa membuat kucing terkena sengatan panas, tapi kalau kedinginan malah bisa sampai menggigil dan susah napas. Udara lembap juga bisa bikin gatal-gatal atau kutuan, justru udara kering bikin kulitnya kering.

Kenyamanan kucing ras bulu panjang amat bergantung pada lingkungan sekitar. Para ahli kesehatan hewan menyarankan suhu terbaik buat mereka ada di antara 15,5 sampai 26,6 derajat Celcius, bersamaan dengan tingkat kelembapan udara 30 hingga 70 persen [4]. Sayangnya, cuaca tropis Indonesia menyebabkan suhu dan kelembapan seringkali berubah-ubah membuat menjaga kondisi ideal itu jadi tantangan. Biasanya, pemilik kucing pakai kipas atau pelembap biasa supaya suhu tetap nyaman. Sayangnya, itu repot karena harus diatur terus-menerus serta boros tenaga. Makanya, dibutuhkan alat pintar yang bisa mengatur sendiri suhu ruangan secara otomatis tentu saja dengan irit listrik.

Teknologi IoT kini memberi harapan untuk menyelesaikan masalah ini. Sensor, mikrokontroler, serta actuator, mereka mengamati keadaan sekitar secara langsung lalu bertindak sendiri tanpa perlu diperintah orang. Beberapa riset sebelumnya telah mengungkap bagaimana IoT bisa dipakai dalam merawat binatang. Sistem pemberian makan otomatis yang memanfaatkan internet telah menunjukkan peningkatan kinerja [5]. Sementara itu, penggunaan logika fuzzy dalam mengendalikan lingkungan hidup ikan cupang juga hamster memelihara suhu serta kelembapan lebih stabil dibandingkan cara lama [6][7]. Perangkat seperti ESP32 yang sudah dilengkapi Wi-Fi dan bisa mengirimkan peringatan lewat Telegram membuat pengawasan dari jarak jauh jadi makin mudah [8]. Sedangkan Miftaharif [9] menerapkan *Fuzzy Logic* dalam sistem keamanan berbasis IoT yang mampu menyesuaikan tindakan terhadap perubahan kondisi sensor. Sensor DHT22 dipilih, karena lebih akurat daripada DHT11 [10], cocok sekali buat mengukur suhu serta kelembapan dengan teliti. Sementara itu, penggunaan logika Fuzzy Mamdani di otomasi kandang ayam broiler [11] terbukti efektif memelihara iklim mikro agar tetap seimbang dan hemat energi.

Penelitian memang sudah maju pesat, namun umumnya cuma membahas peternakan besar, manajemen pakan, dan juga keamanannya saja. Sementara, riset mengenai pengaturan suhu lingkungan untuk hewan kesayangan khususnya kucing ras bulu panjang yang gampang kepanasan atau kedinginan itu minim sekali. Belum lagi, kebanyakan alat otomatisasi sekarang hanya kerja menyala dan mati begitu saja, jadi responsnya kurang akurat dan boros energi.

Karena ada masalah itu, penelitian ini membuat alat pintar untuk mengawasi dan mengatur iklim pada kendang kucing. Alat ini memakai sensor DHT22 untuk baca suhu sama kelembapan, MQ-135 untuk baca kualitas udara, juga sensor tanah untuk baca seberapa basah kotak pasirnya. Lalu, load cell dan water level sensor untuk pantau makanan dan minumannya. Semua info dikirim ke otak alat, yaitu ESP32, yang menggunakan logika Fuzzy Mamdani jadi untuk atur menyala atau matikan fan, heater, atau humidifier sesuai kebutuhan supaya kucing nyaman terus. Data pengawasan langsung muncul di situs web yang dibuat dengan Laravel. Pemberitahuan dikirim lewat Telegram supaya mempermudah pengecekan dari mana saja. Sistem ini dirancang agar membantu merawat kucing ras bulu panjang di iklim tropis jadi lebih mudah, hemat, juga nyaman.



TINJAUAN PUSTAKA

Teknologi IoT bersamaan dengan logika fuzzy kini dipakai luas di sistem otomatis perawatan hewan. Tujuannya, mengawasi sekaligus menyesuaikan lingkungan tempat tinggal mereka. Perpaduan ini membuat mesin bisa bereaksi cepat dan lebih akurat daripada cara lama yang hanya menyala atau mati. Logika fuzzy membantu menghadapi data sensor yang kurang pasti sehingga hasilnya lebih mulus.

Penelitian sebelumnya sudah ada yang membuktikan dengan metode fuzzy mamdani. Misalnya, Fahila, Wibowo, serta Ariwibisono pernah bikin otomasi kandang ayam broiler pakai IoT dengan logika fuzzy Mamdani suhu dan lembapnya jadi lebih terkontrol [11]. Lalu, Garinanto, Wibowo, juga Rudhistiar mencoba hal serupa di kandang hamster biar iklimnya stabil [7]. Bahkan, Muzaky bersama timnya menemukan bahwa fuzzy ampuh mengatasi masalah sensor tak akurat saat memantau kesehatan kandang landak mini [12].

Penelitian tersebut memang memperlihatkan cara bagus untuk melindungi lingkungan hidup hewan. Akan tetapi, umumnya cuma berlaku untuk hewan ternak atau hewan berukuran kecil dimana mereka punya kebutuhan panas tubuh yang tak sama dengan lainnya. Di sisi lain, Devitasari serta Kartika menciptakan alat makan kucing pintar menggunakan teknologi internet [5]. Sayangnya, alatnya kurang memperhatikan soal rasa nyaman akibat cuaca mulai dari suhu dan kelembaban amat krusial bagi kucing berbulu lebat.

Internet of Things

IoT merupakan konsep yang memungkinkan perangkat fisik terhubung melalui internet. Alat ini mengumpulkan, mengirim, dan memproses data tanpa interaksi dengan manusia secara langsung [6][15]. Dalam penelitian ini, IoT digunakan untuk membaca suhu, kelembaban, serta pakan dan air minum, sekaligus memungkinkan pemilik mengakses data secara langsung melalui dashboard.

DHT22

DHT22 merupakan sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara di dalam kandang kucing. Sensor ini memiliki tingkat akurasi tinggi dibandingkan DHT11, dengan galat pengukuran suhu sekitar 4% dan kelembapan 18%, sehingga cocok digunakan untuk sistem monitoring mikroklimat yang membutuhkan kestabilan data [10]. DHT22 bekerja dengan mengubah sinyal resistif dari elemen sensornya menjadi sinyal digital melalui ADC internal, lalu mengirimkan data suhu dan kelembapan secara real-time ke mikrokontroler ESP32. Nilai-nilai tersebut menjadi variabel input utama pada sistem kendali berbasis Fuzzy Logic Mamdani, yang kemudian menentukan besaran keluaran bagi aktuator seperti kipas, pemanas, dan humidifier secara proporsional. Dengan demikian, kombinasi antara sensor DHT22 dan Fuzzy Logic memungkinkan sistem mampu beradaptasi terhadap perubahan lingkungan secara halus dan menjaga suhu serta kelembapan kandang tetap berada pada rentang nyaman bagi kucing berbulu panjang.

Ceramic Heat Emitter

Ceramic heat emitter (heater) merupakan alat yang mengubah energi listrik menjadi energi panas. Komponen ini bekerja dengan mengalirkan arus listrik melalui elemen pemanas berbahan keramik sehingga menghasilkan pancaran panas infra merah tanpa mengeluarkan cahaya [7]. Panas yang dihasilkan digunakan untuk menaikkan suhu lingkungan di dalam kandang hingga mencapai nilai yang ditentukan oleh sistem kendali. Dibandingkan lampu pijar konvensional, ceramic heat emitter memiliki keunggulan pada efisiensi energi dan daya tahan terhadap panas tinggi karena tidak mengandung filamen. Selain itu, elemen keramik memungkinkan distribusi panas yang merata dan aman bagi hewan peliharaan, sehingga cocok digunakan dalam sistem kendali suhu otomatis berbasis Fuzzy Logic.

Kipas DC 12 V

Kipas DC 12 V berfungsi menghasilkan sirkulasi udara guna menjaga kestabilan suhu dan memperlancar pertukaran udara di dalam kandang. Kipas bekerja dengan memanfaatkan motor DC yang mengubah energi listrik menjadi gerakan putar untuk mengalirkan udara. Dalam sistem kendali ini, kecepatan kipas diatur secara proporsional berdasarkan keluaran hasil inferensi Fuzzy Logic untuk menurunkan suhu ketika terdeteksi kondisi panas berlebih. Secara umum, kipas digunakan sebagai alat pendingin atau ventilasi untuk mempertahankan suhu udara agar tidak melebihi batas tertentu [7]. Kombinasi kerja kipas dan heater secara adaptif membantu menjaga keseimbangan suhu lingkungan dengan konsumsi energi yang efisien.

Humidifier

Humidifier adalah perangkat yang berfungsi untuk meningkatkan kelembapan udara dengan cara mengubah air menjadi uap mikro yang disemprotkan ke atmosfer ruangan. Uap air yang dihasilkan humidifier akan meningkatkan kadar kelembapan hingga mencapai kisaran ideal yang telah ditentukan [13]. Pada penelitian ini, humidifier dikendalikan secara otomatis oleh sistem berbasis IoT dan Fuzzy Logic untuk menjaga kelembapan kandang tetap stabil sesuai kondisi yang direkomendasikan oleh ASPCA (30-70%). Prinsip kerja humidifier yang memanfaatkan efek piezoelektrik menjadikannya hemat energi dan cocok diterapkan dalam sistem otomatisasi skala kecil seperti kandang hewan peliharaan.

Logika Fuzzy Mamdani

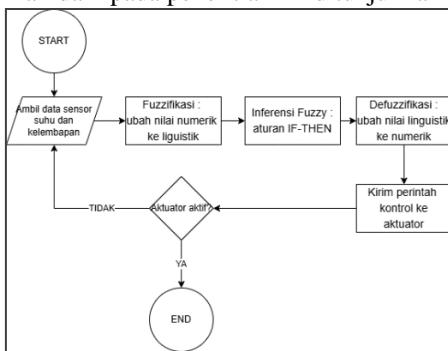
Fuzzy Mamdani diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975 sebagai salah satu metode inferensi fuzzy. Sistem ini menggunakan aturan berbasis if then dengan variabel input dan output dalam bentuk himpunan fuzzy. Keunggulannya adalah mampu menangani ketidakpastian dan menghasilkan keputusan yang lebih halus dibanding logika



biner [14]. Dalam penelitian ini, metode Mamdani digunakan untuk mengontrol kipas, humidifier dan pemanas kandang secara cerdas.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa prototipe untuk merancang, membangun, dan menguji sistem monitoring serta kontrol otomatis pada kandang kucing berbulu panjang berbasis Internet of Things (IoT) dan logika fuzzy Mamdani. Logika fuzzy Mamdani memiliki dua variabel input, yaitu suhu ($^{\circ}\text{C}$) dan kelembapan (%RH). Secara umum, alur kerja sistem kendali fuzzy Mamdani pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Metode Logika Fuzzy

Proses diawali dengan pengambilan data dari sensor suhu dan kelembapan yang terpasang di dalam kandang. Data tersebut dikirim secara berkala ke mikrokontroler ESP32 untuk diolah. Nilai hasil pembacaan sensor yang masih bersifat numerik kemudian melalui tahap fuzzifikasi, yaitu proses mengubah data kuantitatif menjadi bentuk linguistik agar dapat diproses oleh sistem logika fuzzy. Tahap ini memungkinkan sistem memahami kondisi lingkungan dalam kategori seperti “dingin”, “normal”, atau “panas” untuk suhu, dan “kering”, “normal”, atau “lembap” untuk kelembapan.

Selanjutnya, proses inferensi fuzzy dilakukan menggunakan aturan If Then yang telah ditentukan dalam basis aturan (rule base) pada Tabel 2. Pada tahap ini, sistem menilai kombinasi kondisi suhu dan kelembapan untuk menentukan aksi pengendalian yang paling sesuai.

Setelah keputusan diperoleh, dilakukan defuzzifikasi untuk mengubah nilai linguistik tersebut menjadi nilai numerik agar dapat dikirim sebagai sinyal kontrol ke aktuator. Mikrokontroler kemudian menyesuaikan kecepatan kipas DC 12 V, intensitas kerja heater keramik, dan durasi aktif humidifier 5 V sesuai hasil inferensi. Dengan demikian, sistem mampu mengatur kondisi mikroklimat kandang secara otomatis dan adaptif.

Bentuk fungsi keanggotaan untuk suhu ditunjukkan pada Persamaan (1)-(3) dan untuk kelembapan ditunjukkan pada persamaan (4)-(6).

$$\mu_{\text{Dingin}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 12 \\ \frac{18-x}{6}, & 12 < x \leq 18 \\ 0, & x > 18 \end{cases} \quad (1) \quad \mu_{\text{Kering}}(h) = \begin{cases} 1, & h \leq 20 \\ \frac{40-h}{20}, & 20 < h \leq 40 \\ 0, & h > 40 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{\text{Normal}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 15 \text{ atau } x \geq 26 \\ \frac{x-15}{6}, & 15 < x \leq 21 \\ \frac{26-x}{5}, & 21 < x < 26 \end{cases} \quad (2) \quad \mu_{\text{Normal}}(h) = \begin{cases} 0, & h \leq 30 \text{ atau } h \geq 70 \\ \frac{h-30}{20}, & 30 < h \leq 50 \\ \frac{70-h}{20}, & 50 < h < 70 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{\text{Panas}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 24 \\ \frac{x-24}{6}, & 24 < x \leq 30 \\ 1, & x > 30 \end{cases} \quad (3) \quad \mu_{\text{Lembap}}(h) = \begin{cases} 0, & h \leq 60 \\ \frac{h-60}{20}, & 60 < h \leq 80 \\ 1, & h > 80 \end{cases} \quad (6)$$

Setelah fungsi keanggotaan untuk variabel input suhu dan kelembapan ditentukan, tahap berikutnya adalah mendefinisikan variabel output sebagai pengendali aktuator. Variabel output dalam sistem ini terdiri atas kipas (fan), pemanas (heater), dan humidifier. Masing-masing memiliki empat tingkat kendali, yaitu *Off*, *Low*, *Medium*, dan *High*, seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai ini kemudian dikonversi menjadi sinyal kendali aktual oleh mikrokontroler ESP32 agar mampu mengatur kecepatan kipas serta durasi kerja heater dan humidifier secara proporsional.

Tabel 1. Tabel Variabel Output Fuzzy
Variabel Output Fuzzy Mamdani

No	Variabel Output	Himpunan	Range (%)
----	-----------------	----------	-----------



1	Fan (PWM)	Off	0-18
		Low	15-45
		Medium	35-75
		High	65-100
2	Heater (Time Slice)	Off	0-18
		Low	15-45
		Medium	35-75
		High	65-100
3	Humidifier (Time Slice)	Off	0-18
		Low	15-45
		Medium	35-75
		High	65-100

Berdasarkan kombinasi fungsi keanggotaan input dan output, sistem fuzzy Mamdani membentuk basis aturan (*rule base*) yang menghubungkan kondisi suhu dan kelembapan terhadap aksi kendali pada tiga aktuator utama. Tabel 2 memperlihatkan sembilan aturan fuzzy (if-then rules) yang digunakan pada sistem ini. Setiap aturan merepresentasikan kombinasi kondisi lingkungan tertentu untuk menghasilkan tindakan kendali yang paling sesuai agar suhu dan kelembapan tetap berada dalam zona nyaman.

Tabel 2. Tabel Basis Aturan Fuzzy
Basis Aturan Fuzzy Mamdani

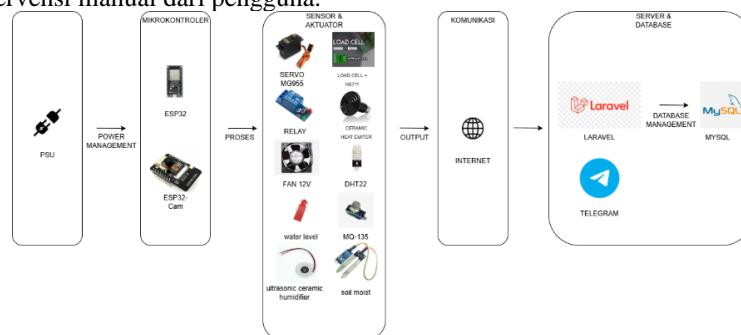
No	Kondisi Lingkungan	Fan	Heater	Humidifier
1	Dingin-Kering	Off	High	High
2	Dingin-Normal	Off	High	Off
3	Dingin-Lembab	Off	High	Off
4	Normal-Kering	Off	Off	High
5	Normal-Normal	Off	Off	Off
6	Normal-Lembab	Low	Off	Off
7	Panas-Kering	High	Off	High
8	Panas-Normal	High	Off	Off
9	Panas-Lembab	High	Off	Off

Setelah model fuzzy dirancang, tahapan berikutnya adalah perancangan sistem fisik untuk menerapkan logika tersebut pada perangkat keras berbasis IoT. Tahap ini mengintegrasikan sensor, mikrokontroler, dan aktuator dalam satu sistem kendali yang dapat beroperasi otomatis berdasarkan hasil inferensi fuzzy.

Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem dilakukan dengan mengintegrasikan seluruh komponen utama yang terdiri dari sensor, mikrokontroler, dan aktuator ke dalam satu kesatuan sistem yang saling terhubung sebagaimana ditunjukkan pada blok diagram pada Gambar 2. Sensor DHT22 digunakan untuk membaca suhu dan kelembapan udara, sementara sensor soil moisture berfungsi memantau kelembapan pasir pada litter box untuk memastikan kondisi dasar kandang tetap kering dan higienis. Selain itu, terdapat sensor MQ-135 yang mendeteksi kualitas udara di sekitar kandang, sensor water level untuk mengukur ketinggian air pada wadah minum, serta sensor load cell HX711 yang digunakan untuk mengetahui berat pakan. Semua data sensor dikirim ke mikrokontroler ESP32 untuk diolah; namun, hanya data suhu dan kelembapan dari DHT22 yang diproses oleh sistem fuzzy Mamdani guna menghasilkan keputusan kendali terhadap tiga aktuator utama.

Hasil inferensi fuzzy tersebut menentukan kecepatan kipas DC 12 V yang dikontrol melalui modul L298N, intensitas kerja heater berbasis lampu infrared yang diatur menggunakan SSR-40DA, serta durasi aktif humidifier DC 5 V yang dikendalikan oleh modul relay. Mikrokontroler ESP32 juga bertanggung jawab mengirimkan data sensor dan status aktuator ke server berbasis Laravel melalui koneksi Wi-Fi, sehingga kondisi kandang dapat dipantau secara real-time melalui dashboard web. Dengan desain ini, sistem mampu beroperasi secara otomatis untuk menjaga stabilitas suhu dan kelembapan tanpa intervensi manual dari pengguna.

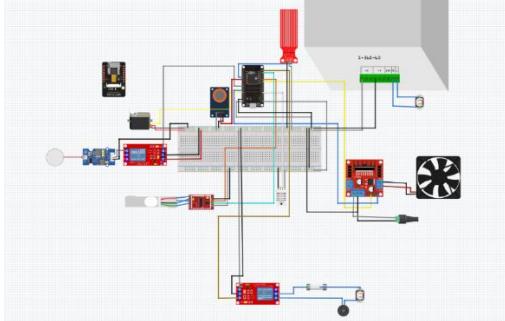


Gambar 2. Blok Diagram Sistem



Rangkaian skematik sistem ditunjukkan pada Gambar 3, yang memperlihatkan hubungan antara sensor, aktuator, dan mikrokontroler ESP32 secara keseluruhan. Setiap sensor dihubungkan ke pin input digital maupun analog sesuai fungsinya, sementara aktuator dikendalikan melalui pin output dengan pengaturan tegangan dan arus yang disesuaikan. Untuk menjaga kestabilan kerja sistem, digunakan dua jalur catu daya utama, yaitu 5 V DC untuk sensor dan perangkat logika seperti DHT22, MQ-135, soil moisture, load cell HX711, Servo, Humidifier, serta 12 V DC untuk kipas DC.

Khusus untuk heater berbasis ceramic infrared, komponen ini bekerja langsung dengan sumber listrik AC 220 V dan tidak terhubung ke catu DC. Pengendaliannya dilakukan secara elektronik melalui modul Solid State Relay (SSR-40DA) yang diaktifkan oleh sinyal kendali dari pin output ESP32. Dengan cara ini, mikrokontroler tidak menerima beban arus tinggi, tetapi tetap mampu mengatur durasi kerja heater sesuai hasil inferensi fuzzy.



Gambar 3. Rangkaian Skematik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perakitan sistem IoT ditunjukkan pada Gambar 4. Prototipe menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali dengan sensor DHT22, MQ-135, soil moisture, HX711, dan water level sebagai masukan. Aktuator terdiri atas kipas DC, humidifier, serta heater yang dikendalikan oleh SSR-40DA. Seluruh modul terhubung sesuai konfigurasi pin ESP32 dengan catu daya terpisah 5 V dan 12 V untuk menjamin kestabilan tegangan selama pengujian. Seluruh komponen ditempatkan pada papan prototipe agar rangkaian lebih rapi dan mudah diinspeksi selama proses pengujian. Selain itu, sistem telah dilengkapi dengan jalur koneksi Wi-Fi sehingga data sensor dapat dikirim secara real-time ke dashboard web berbasis Laravel untuk pemantauan dan analisis performa.



Gambar 4. Hasil Rangkaian Perangkat Keras

Pengujian sensor DHT22 dilakukan untuk memastikan akurasi dan kestabilan pembacaan suhu dan kelembapan udara yang menjadi input utama pada sistem kendali fuzzy Mamdani. Sensor DHT22 diuji dengan membandingkan hasil pembacaan dengan termohigrometer referensi selama 20 menit. Hasilnya menunjukkan deviasi rata-rata $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 2,2\%$ RH untuk kelembapan, yang masih berada dalam batas akurasi standar sensor tersebut. Kinerja ini lebih baik dibandingkan penelitian Garinanto et al. (2021) yang melaporkan tingkat akurasi kelembapan hanya sebesar 78,06%. Perbedaan akurasi ini disebabkan oleh kondisi lingkungan pengujian yang lebih terkendali serta penggunaan interval pembacaan yang konsisten pada sistem ini. Dengan demikian, DHT22 dapat dinilai cukup akurat sebagai input utama kontrol fuzzy Mamdani.

Perbandingan hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 1. Dari data tersebut, terlihat bahwa DHT22 memiliki akurasi yang cukup tinggi dan respon cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan. Hal ini menunjukkan bahwa sensor DHT22 layak digunakan sebagai sumber data masukan sistem fuzzy yang memerlukan kestabilan dan ketepatan pembacaan secara real-time.

Tabel 3. Tabel Pengujian Untuk Sensor DHT22
Pengujian Untuk DHT22

No	Suhu DHT22 (°C)	Suhu HTC-2 (°C)	Selisih (°C)	RH DHT22 (%)	RH HTC-2 (%)	Selisih (%)
1	27,8	27,2	+0,6	65,2	66	-0,8
2	27,6	27,0	+0,6	64,5	66	-1,5



3	27,5	27,1	+0,4	65,1	66	-0,9
4	27,3	27,3	0	63,8	66	-2,2
5	27,7	27,5	+0,2	65,2	65	-0,2
6	27,4	27,5	-0,1	64,9	65	-1,1
7	27,9	27,6	+0,3	64,6	66	-1,4
8	27,8	27,4	+0,4	66,8	66	+0,8
9	27,2	27,3	-0,1	66,4	66	+0,4
10	27,5	27,4	+0,1	65,2	65	+0,2

Pengujian sistem kendali fuzzy Mamdani dilakukan untuk menilai kemampuan sistem dalam mengatur suhu dan kelembaban kandang agar tetap berada pada rentang kenyamanan kucing berbulu panjang, yaitu suhu 15,5-26,6 °C dan kelembaban 30-70 %RH. Pengujian dimulai dari kondisi awal suhu dan kelembaban yang melebihi batas atas (27,4 °C dan 71 %RH), kemudian sistem dijalankan secara otomatis tanpa intervensi manual. Sensor DHT22 membaca kondisi lingkungan setiap dua menit, dan mikrokontroler ESP32 memproses data melalui sistem inferensi fuzzy untuk menghasilkan sinyal kendali bagi fan, heater, dan humidifier.

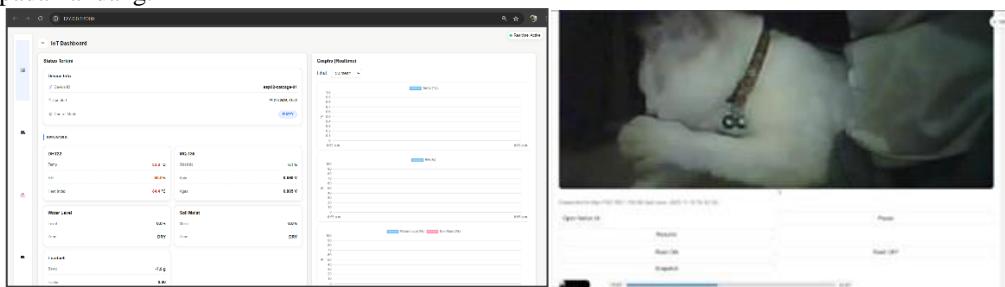
Tabel 4. Hasil Pengujian Pengendalian Suhu dan Kelembapan Berbasis Fuzzy Mamdani
Pengujian Pengendalian Suhu dan Kelembapan Berbasis Fuzzy Mamdani

No	Suhu DHT22 (°C)	RH DHT22 (%)	Fan Duty	Heater Duty	Humid Duty
1	28,8	71,2	100	0	0
2	28,6	70,6	100	0	0
3	28,5	70,1	100	0	0
4	28,1	69,6	100	0	0
5	28,0	69,3	100	0	0
6	28,1	68,6	100	0	0
7	27,9	68,2	100	0	0
8	27,8	68,4	100	0	0
9	27,8	67,9	100	0	0
10	27,5	67,5	100	0	0

Dari hasil pada Tabel 4, terlihat bahwa sistem fuzzy mampu menurunkan suhu secara bertahap dari 28,8 °C menjadi 27,5 °C dan menstabilkan kelembapan dari 71,2 % menjadi 67,5 %RH dalam waktu 20 menit. Hasil ini menunjukkan bahwa kontrol fuzzy Mamdani menghasilkan respon yang halus dan adaptif. Pola respon ini sejalan dengan penelitian Fahila et al. (2024), yang juga menunjukkan bahwa fuzzy Mamdani efektif dalam menjaga kestabilan suhu dan kelembapan pada sistem berbasis IoT. Namun, waktu respons sistem pada penelitian ini lebih cepat (penurunan 1,3 °C dalam 20 menit), karena diterapkan pada ruang skala kecil dengan daya heater dan fan yang lebih adaptif.

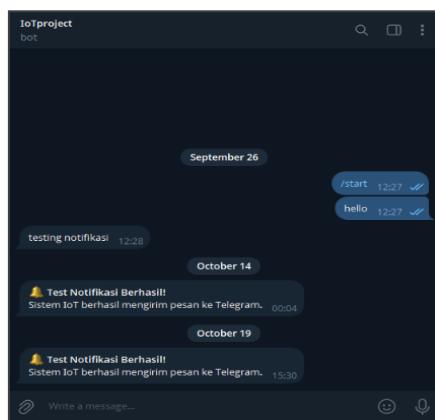
Pengujian integrasi IoT dan kamera dilakukan untuk memastikan seluruh komponen sistem dapat berfungsi secara sinkron antara pemantauan data sensor dan visualisasi kondisi kandang secara real-time. Mikrokontroler ESP32 dikonfigurasi untuk mengirimkan data suhu, kelembapan, dan status aktuator setiap 3 detik dalam format JSON melalui koneksi Wi-Fi 2,4 GHz menggunakan metode HTTP POST, sedangkan modul ESP32-CAM berperan dalam menangkap citra langsung dan menyalurnykannya ke server yang sama.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa data sensor dapat diterima server dengan rata-rata delay 500-1000 milidetik, dan ditampilkan secara langsung pada dashboard web berbasis Laravel, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, yang menampilkan suhu, kelembapan, status aktuator, serta tampilan streaming dari kamera ESP32-CAM. Nilai ini lebih rendah dibanding beberapa penelitian IoT berbasis ESP32 pada lingkungan luas (Arini et al., 2024), sehingga sistem ini dapat dikategorikan responsif untuk monitoring real-time. Namun demikian, sistem ini juga memiliki keterbatasan. Modul ESP32-CAM memerlukan pencahayaan ruangan >500 lux agar hasil citra tidak buram, sehingga dibutuhkan penambahan lampu LED pada kandang.



Gambar 4. Pengujian Dashboard dan Tampilan Kamera

Selain itu, sistem juga mampu mengirimkan pesan notifikasi otomatis melalui Telegram Bot apabila suhu atau kelembapan keluar dari batas yang ditentukan, seperti diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Gambar Pengujian Notifikasi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem fuzzy Mamdani pada penelitian ini bekerja stabil dan responsif, dengan penurunan suhu dari 28,8 °C menjadi 27,5 °C serta kelembapan dari 71,2 %RH menjadi 67,5 %RH dalam 20 menit, sejalan dengan penelitian Fahila et al. (2024) namun dengan respons lebih cepat pada ruang skala kecil. Stabilitas kelembapan yang lebih halus dibanding Garinanto et al. (2021) menunjukkan bahwa desain fungsi keanggotaan dan rule base yang digunakan lebih efektif dalam mencegah fluktuasi dan overshoot. Integrasi dashboard Laravel, ESP32-CAM, serta notifikasi Telegram memberikan nilai tambah dibanding studi IoT hewan sebelumnya, walaupun sistem masih memiliki keterbatasan seperti ketergantungan pada Wi-Fi 2,4 GHz, kebutuhan pencahayaan tinggi untuk kamera, serta belum adanya pengujian jangka panjang pada kondisi ekstrem.

Setelah seluruh tahap pengujian perangkat keras dan integrasi sistem dilakukan, langkah berikutnya adalah pengujian black-box untuk memastikan bahwa setiap fungsi pada sistem IoT dan logika fuzzy Mamdani bekerja sebagaimana mestinya. Pengujian ini mencakup validasi pembacaan sensor, kendali aktuator, serta tampilan dashboard dan komunikasi data. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Black-Box Sistem IoT dan Fuzzy Mamdani
Pengujian Black-Box Sistem IoT dan Fuzzy Mamdani

ID	Skenario Uji	Hasil Yang Diharapkan	Hasil Aktual	Status
BB-01	Pembacaan sensor DHT22	Nilai suhu dan kelembapan terbaca stabil dengan deviasi $\leq \pm 1$ °C dan ± 3 % RH dibanding alat HTC-2	Data terbaca stabil, deviasi 0.28 °C dan 0.95 % RH, sesuai spesifikasi sensor	Berhasil
BB-02	Proses fuzzifikasi dan inferensi	Keluaran aktuator menyesuaikan kombinasi suhu-kelembapan sesuai aturan fuzzy (fan, heater, humidifier)	Proses berjalan baik, respon aktuator sesuai rule base dan proporsional	Berhasil
BB-03	Tampilan dashboard web	Data suhu, RH, dan status aktuator tampil real-time dengan pembaruan ≤ 1000 ms	Dashboard menampilkan grafik, tabel, dan indikator status secara real-time tanpa error	Berhasil
BB-04	Fungsi login dan register	Pengguna dapat masuk dan membuat akun baru tanpa kesalahan otentifikasi	Login dan register berhasil	Berhasil
BB-05	Fitur grafik dan tabel	Data historis tersimpan dan tampil dalam grafik serta tabel di dashboard	Grafik dan tabel tampil dengan akurasi waktu dan nilai yang benar	Berhasil
BB-06	Fitur history dashboard	Data log sensor dan aktuator tersimpan sesuai waktu dan dapat difilter	History muncul lengkap dan sesuai periode waktu pengujian	Berhasil
BB-07	Fitur logout pengguna	Sistem keluar dari sesi aktif dan kembali ke halaman login	Logout berhasil	Berhasil
BB-08	Streaming kamera ESP32-CAM	Gambar tampil real-time dengan jeda ≤ 2 detik, kualitas baik di pencahayaan cukup	Streaming berjalan lancar, kualitas gambar stabil pada pencahayaan ≥ 500 lux	Berhasil
BB-09	Notifikasi Telegram otomatis	Pesan dikirim ketika terjadi sesuatu	Pesan diterima < 3 detik setelah pelanggaran batas, format pesan sesuai	Berhasil



Hasil pengujian integrasi ini membuktikan bahwa sistem IoT berbasis ESP32 dan Laravel dapat bekerja secara sinkron dengan komunikasi data yang stabil, user interface yang responsif, serta integrasi visual kamera yang memperkaya fungsi pemantauan jarak jauh. Keberadaan modul ESP32-CAM memungkinkan pengguna untuk melihat kondisi hewan secara langsung tanpa harus berada di lokasi, sehingga meningkatkan aspek kenyamanan dan keamanan pemantauan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem monitoring dan kontrol kandang kucing berbulu panjang berbasis IoT dengan logika fuzzy Mamdani mampu berfungsi secara efektif dan adaptif dalam menjaga kondisi lingkungan kandang tetap stabil. Sensor DHT22 memiliki akurasi pembacaan yang baik dengan deviasi rata-rata $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 2,2\%$ RH untuk kelembapan dibandingkan alat ukur referensi. Sistem fuzzy Mamdani berhasil mengatur kecepatan kipas, kerja heater, dan durasi aktif humidifier secara proporsional berdasarkan hasil inferensi fuzzy, sehingga suhu dan kelembapan dapat dipertahankan dalam rentang kenyamanan kucing berbulu panjang ($15,5\text{--}26^{\circ}\text{C}$ dan $30\text{--}70\% \text{RH}$) tanpa terjadi overshoot. Integrasi sistem berbasis mikrokontroler ESP32 dengan dashboard web Laravel menunjukkan kinerja yang stabil dengan rata-rata delay pengiriman data 500-1000 milidetik, serta mampu menampilkan data sensor, status aktuator, dan streaming kamera secara real-time. Sistem juga dapat mengirimkan notifikasi otomatis melalui Telegram ketika kondisi lingkungan keluar dari batas yang telah ditentukan. Dengan demikian, sistem ini terbukti layak digunakan sebagai solusi otomatis untuk menjaga kenyamanan, kesehatan, dan efisiensi perawatan kucing berbulu panjang di lingkungan tropis.

Beberapa saran untuk pengembangan sistem di masa mendatang antara lain, peningkatan kualitas kamera ESP32-CAM dengan menambahkan pencahayaan ruangan minimal 500 lux agar hasil citra lebih jelas dan stabil terutama pada kondisi cahaya rendah, sebagaimana disarankan oleh dosen pembimbing. Selain itu, sistem dapat dikembangkan lebih lanjut dengan penambahan algoritma machine learning sederhana untuk mendeteksi aktivitas kucing, serta pengendalian berbasis aplikasi mobile dan penyimpanan data cloud agar pemantauan dapat dilakukan dari berbagai perangkat dan lokasi. Pengujian jangka panjang di lingkungan nyata juga disarankan untuk menilai ketahanan sistem terhadap variasi suhu dan kelembapan yang lebih ekstrem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Siagian, T. B., Tjiumenra, E. S., Nurul, & Siagian, G. Y. H., 2023, Gambaran Pengetahuan Pemilik Kucing Tentang Cara Pencegahan Penyakit Pada Kucing Peliharaannya Selama Pandemi COVID-19, *Jurnal Sains Terapan : Wahana Informasi dan Alih Teknologi Pertanian*, Vol. 13, No. 2, pp. 59–67, IPB University, Bogor, doi:10.29244/jstsv.13.2.59-67
- [2] Kemala, S., Fakhriza, M., & Nasution, A. B., 2024, E-Health Indeks Tubuh Kucing Persia Menggunakan Fuzzy Logic Tsukamoto Berbasis Website, *Saintek: Jurnal Ilmiah Sains dan Teknologi*, Vol. 8, No. 2, pp. 263–273, Universitas Banten Jaya, Medan
- [3] Gunawan, L., Indarjulianto, S., Yanuartono, Nurcahyo, R. W., & Prastowo, J., 2024, Infestasi Ektoparasit pada Pasien Kucing yang Memiliki Masalah Kulit di Klinik Hewan Lilipoet Yogyakarta, *Jurnal Sain Veteriner*, Vol. 42, No. 2, pp. 169–177, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- [4] Association of Shelter Veterinarians & American Society for the Prevention of Cruelty to Animals (ASPCA), 2023, Shelter Care Checklists: Putting ASV Guidelines Into Action, Association of Shelter Veterinarians, [Online], Available: <https://aspapro.org/asv>
- [5] Devitasari, R., & Kartika, K. P., 2020, Rancang Bangun Alat Pemberi Pakan Kucing Otomatis Menggunakan Mikrokontroler NodeMCU Berbasis Internet of Things (IoT), *Antivirus: Jurnal Ilmiah Teknik Informatika*, Vol. 14, No. 2, pp. 152–164, Universitas Islam Balitar, Blitar
- [6] Fauzi, A., Wibowo, S. A., & Prasetya, R. P., 2021, Penerapan Internet of Things terhadap Rancang Bangun Sistem Monitoring Perawatan dan Pengingat Pemberian Pakan pada Ikan Cupang dengan Metode Fuzzy, *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, Vol. 5, No. 2, pp. 645–652, Institut Teknologi Nasional Malang, Malang
- [7] Garinanto, B., Wibowo, S. A., & Rudhistiar, D., 2021, Penerapan Metode Fuzzy untuk Smart Farming Hamster Berbasis IoT, *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, Vol. 5, No. 2, pp. 693–699, Institut Teknologi Nasional Malang, Malang
- [8] Suriana, I. W., Setiawan, I. G. A., & Graha, I. M. S., 2021, Rancang Bangun Sistem Pengaman Kotak Dana Punia berbasis Mikrokontroler NodeMCU ESP32 dan Aplikasi Telegram, *Jurnal Ilmiah TELSINAS*, Vol. 4, No. 2, pp. 11–20, Universitas Pendidikan Nasional, Denpasar
- [9] Miftaharif, R. A., Wibowo, S. A., & Faisol, A., 2023, Perancangan dan Pembuatan Sistem Keamanan Ruang Laundry Berbasis IoT Menggunakan Metode Fuzzy Logic, *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, Vol. 7, No. 4, pp. 2358–2365, Institut Teknologi Nasional Malang, Malang
- [10] Arini, N. I., Etruly, N., & Prasetya, J., 2024, Design of IoT-Based Temperature and Humidity Monitoring System to Support Work Environment Safety in Furniture Workshop, *Jurnal Inovatif: Inovasi Teknologi Informasi dan Informatika*, Vol. 7, No. 2, pp. 126–134, Universitas Ibn Khaldun Bogor, doi:10.32832/inovatif
- [11] Fahila, N. A., Wibowo, S. A., & Ariwibisono, F. X., 2024, Implementasi Fuzzy Mamdani pada Sistem Automasi dan Monitoring Ayam Broiler Berbasis Internet of Things (IoT), *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, Vol. 8, No. 2, pp. 1314–1322, Institut Teknologi Nasional Malang, Malang
- [12] Muzaky, M. R., Pranoto, Y. A., & Vendyansyah, N., 2021, Penerapan IoT (Internet of Things) pada Pemantauan Kesehatan Kandang Hewan Jenis Landak Mini Berbasis Arduino dengan Menggunakan Metode Logika Fuzzy, *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, Vol. 5, No. 2, pp. 541–547, Institut Teknologi Nasional Malang, Malang
- [13] Zakiyyah, A. Z., Sumariyah, & Suseno, J. E., 2021, Rancang Bangun Sistem Kendali Humidifier Jarak Jauh Berbasis Mikrokontroler dengan IoT (Internet of Things), *Berkala Fisika*, Vol. 24, No. 4, pp. 122–131, Universitas Diponegoro, Semarang



- [14] Putri, O. R., Sudarwati, W., Wardah, S., Marfuah, U., & Purnamasari, A., 2024, Aplikasi Sistem Inferensi Fuzzy Metode Mamdani untuk Memprediksi Jumlah Produksi Pakaian pada Industri Kreatif Fesyen, Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2024, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta, pp. 1–10
- [15] Selay, A., Andgha, G. D., Alfarizi, M. A., Wahyudi, M. I. B., Falah, M. N., & Khaira, M., 2022, Internet of Things, Karimah Tauhid: Jurnal Ilmiah, Vol. 1, No. 6, pp. 860–868, Universitas Djuanda, Bogor