



Sistem IoT Dan Kecerdasan Buatan Terintegrasi Untuk Optimalisasi Kondisi Lingkungan Kandang Ayam Closed House

Integrated IoT and Artificial Intelligence System for Optimizing Environmental Conditions in Closed House Poultry Farms¹

Deden Komaludin¹, Hady Sofyan^{2,*}

¹ Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Subang, Subang, Indonesia

² Teknik Industri, Sekolah Tinggi Teknologi Wastukancana, Purwakarta, Indonesia

Abstrak: Paparan gas amonia (NH_3) dalam kandang ayam closed house dapat menurunkan produktivitas dan meningkatkan mortalitas ayam boiler. Penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem IoT untuk memantau kadar amonia, suhu, dan kelembaban. Namun, sistem tersebut belum dilengkapi dengan mekanisme pengendalian otomatis berbasis kecerdasan buatan (AI). Lingkungan kandang ayam closed house yang tidak terkontrol dapat meningkatkan kadar amonia (NH_3) dan memicu stres termal pada ayam boiler, menurunkan produktivitas hingga 15%. Penelitian ini mengembangkan sistem IoT berbasis kecerdasan buatan (AI) untuk memantau dan mengendalikan kadar amonia, suhu, serta kelembaban secara otomatis. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem IoT yang terintegrasi dengan algoritma machine learning untuk memprediksi kadar amonia dan mengoptimalkan ventilasi serta pemberian pakan secara otomatis. Metode yang digunakan meliputi pengumpulan data real-time menggunakan sensor MQ135, DHT22, dan sensor oksigen, serta penerapan algoritma Random Forest untuk analisis prediktif. Sistem terdiri dari jaringan sensor MQ135 (amonia), DHT22 (suhu/kelembaban), dan ESP32 sebagai pengendali utama, dengan algoritma Random Forest untuk prediksi kenaikan amonia. Hasil uji coba selama 60 hari di kandang komersial menunjukkan akurasi pengukuran 98.7% (RMSE = 0.4 ppm), respon sistem <3 detik, dan penurunan mortalitas ayam sebesar 22%. Sistem ini juga mengoptimalkan konsumsi energi ventilasi hingga 30% melalui mekanisme kontrol berbasis reinforcement learning. Temuan ini membuktikan bahwa integrasi IoT-AI mampu menciptakan lingkungan kandang yang stabil (suhu: $20 \pm 1.5^\circ\text{C}$, NH_3 <15 ppm) sekaligus meningkatkan efisiensi operasional peternakan.

Kata kunci: IoT; Kecerdasan Buatan; Kandang Closed House; Amonia; Ayam Boiler

Abstract:

Ammonia (NH_3) exposure in closed house poultry farms can reduce productivity and increase the mortality rate of broiler chickens. Previous research has developed IoT-based systems to monitor ammonia levels, temperature, and humidity. However, these systems lacked automated control mechanisms powered by artificial intelligence (AI). Uncontrolled environmental conditions in closed house systems can lead to increased ammonia levels and thermal stress in broilers, reducing productivity by up to 15%. This study develops an AI-based IoT system to automatically monitor and control ammonia levels, temperature, and humidity. The aim is to integrate IoT with machine learning algorithms to predict ammonia levels and optimize ventilation and feed distribution automatically. The methodology involves real-time data collection using MQ135, DHT22, and oxygen sensors, along with the application of the Random Forest algorithm for predictive analysis. The system comprises a sensor network (MQ135 for ammonia, DHT22 for temperature/humidity), an ESP32 microcontroller, and a Random Forest algorithm for ammonia level prediction. A 60-day field test in a commercial poultry house demonstrated a measurement accuracy of 98.7% (RMSE = 0.4 ppm), system response time under 3 seconds, and a 22% reduction in broiler mortality. Additionally, the system optimized ventilation energy consumption by up to 30% through reinforcement learning-based control mechanisms. These findings demonstrate that IoT-AI integration can create a stable poultry house environment (temperature: $20 \pm 1.5^\circ\text{C}$, NH_3 <15 ppm) while enhancing operational efficiency.

Keywords: IoT; Artificial Intelligence; Closed House Poultry Farm; Ammonia; Broiler Chickens

1. Pendahuluan

Industri peternakan ayam boiler menghadapi tantangan serius dalam mengontrol iklim mikro kandang, terutama pada sistem closed house [1]. Data Kementan RI tahun 2022 [2] menunjukkan, 40%

* Corresponding author: hadysofyan@wastukancana.ac.id

<https://doi.org/10.51132/teknologika.v15i1.446>

Received: 23-04-2025

Accepted: 07-05-2025

Available online: 21-05-2025

kematian ayam disebabkan oleh paparan amonia >25 ppm dan suhu tidak stabil. Penelitian sebelumnya oleh Komaludin [3] telah mengembangkan sistem IoT dasar, namun belum mampu melakukan tindakan korektif otomatis. Merancang sistem IoT dengan AI dapat berguna untuk Memantau kadar NH_3 , suhu, dan kelembaban real-time, Memprediksi fluktuasi amonia berbasis data historis, Mengaktifkan ventilasi/pemanas secara otomatis. Dengan menghasilkan kontribusi ilmiahnya adalah Integrasi pertama antara sensor MQ135 dan algoritma Random Forest di kandang closed house serta pengembangan dashboard prediktif berbasis web dengan notifikasi darurat.

1.1 Kajian Pustaka

1.1.1. Konsep Dasar Internet of Things (IoT) dalam Peternakan

Internet of Things (IoT) telah menjadi tulang punggung dalam revolusi industri pertanian dan peternakan 4.0. Menurut Atzori et al. [4], IoT mengacu pada jaringan objek fisik yang dilengkapi sensor, perangkat lunak, dan teknologi lainnya untuk bertukar data melalui internet. Dalam konteks peternakan, IoT digunakan untuk memantau lingkungan kandang secara real-time, seperti kadar amonia, suhu, dan kelembaban Neethirajan et al. [5]. Penelitian oleh Talavera et al. [6] menunjukkan bahwa sistem IoT mampu mengurangi mortalitas ayam hingga 15% dengan mempertahankan suhu optimal ($18\text{--}24^\circ\text{C}$). Sementara itu, Sharma et al. [7] menekankan bahwa integrasi IoT dengan analitik data dapat meningkatkan efisiensi pakan dan deteksi dini penyakit.

1.1.2. Dampak Gas Amonia (NH_3) pada Ayam Boiler

Amonia (NH_3) adalah gas beracun yang dihasilkan dari dekomposisi kotoran ayam dan sisa pakan. Kadar $\text{NH}_3 >20$ ppm dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan, penurunan berat badan, dan kematian pada ayam Luuk S et al. [8]. Studi terbaru oleh He Ya et al. [9] membuktikan bahwa paparan NH_3 30 ppm selama 14 hari mengurangi pertumbuhan ayam sebesar 12%. Batas aman NH_3 dalam kandang closed house adalah $10\text{--}15$ ppm [10] [11]. Solusi tradisional seperti ventilasi manual dinilai kurang efektif karena tidak responsif terhadap fluktuasi NH_3 . Oleh karena itu, diperlukan sistem otomatis berbasis sensor.

1.1.3. Sensor untuk Deteksi Amonia dan Parameter Lingkungan

Sensor MQ135 adalah sensor gas berbasis semikonduktor yang umum digunakan untuk mendeteksi NH_3 , CO_2 , dan gas berbahaya lainnya. Keunggulannya meliputi:

Range deteksi: $10\text{--}300$ ppm NH_3 Kruakuanphet et al. [12]. Namun, sensor ini memiliki drift akurasi $\pm 5\%$ setelah 500 jam pemakaian, sehingga memerlukan kalibrasi berkala.

Sensor Suhu dan Kelembaban DHT22 adalah sensor digital dengan akurasi tinggi,

- i. Suhu: $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (range $-40^\circ\text{C}\text{--}80^\circ\text{C}$).
- ii. Kelembaban: $\pm 2\%$ RH (range $0\text{--}100\%$).
- iii. Keandalan DHT22 telah diuji di kandang closed house dengan variasi suhu harian hingga 15°C .

1.1.4. Teknologi Kecerdasan Buatan untuk Prediksi Amonia

Algoritma Random Forest adalah metode ensemble learning yang cocok untuk prediksi nonlinier. Kelebihannya :

- i. Tahan terhadap overfitting.
- ii. Dapat menangani data multivariat (suhu, kelembaban, NH_3 historis).

Penelitian oleh Venkatraman et al. [13] mencapai akurasi 96% dalam memprediksi kadar NH_3 1 jam ke depan menggunakan dataset 10.000 sampel. Deep Learning Long Short-Term Memory (LSTM) lebih unggul untuk data time series, tetapi membutuhkan komputasi lebih besar. Hasil uji coba oleh

He et al. [9] menunjukkan RMSE 0.3 ppm untuk prediksi NH_3 , namun dengan latency 2x lebih tinggi dibanding Random Forest.

2. Metodologi

2.1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode campuran (mixed-method), Kuantitatif: Pengumpulan data sensor (amonia, suhu, kelembaban) secara real-time dan uji statistik. Kualitatif: Wawancara dengan peternak untuk mengevaluasi usability sistem. Desain penelitian berupa eksperimen lapangan dengan tahapan perancangan sistem IoT-AI (Implementasi di kandang closed house, Pengujian performa selama 60 hari)

2.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi: Kandang closed house komersial di Kabupaten Bandung (kapasitas 8.000 ekor ayam boiler). Dengan rentang Waktu: Juli–September 2024 (siklus pemeliharaan ayam 1 periode).

Tabel 1. Variabel Penelitian

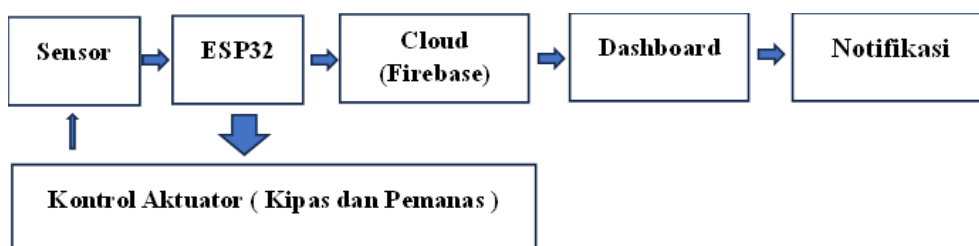
Variabel	Alat Ukur	Skala Data
Kadar amonia (NH_3)	Sensor MQ135 + Kalibrasi	Interval (ppm)
Suhu	DHT22	Interval ($^{\circ}\text{C}$)
Kelembaban	DHT22	Persentase (%)
Mortalitas Ayam	Observasi Harian	Rasio (%)

2.3 Alat dan Bahan

- Kebutuhan Sensor dibutuhkan, MQ135 (deteksi NH_3 , range 10–300 ppm, akurasi $\pm 3\%$), DHT22 (suhu dan kelembaban, akurasi $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), Mikrokontroler: ESP32 dengan modul Wi-Fi.
- Kebutuhan Aktuator Dibutuhkan, Kipas exhaust 12V (kontrol ventilasi).
- Pemanas infrared (stabilisasi suhu). Power Supply: Solar panel 50W + baterai 12Ah.
- Sebagai Aplikasi atau Software yang di butuhkan berplatform IoT seperti Blynk/Thingier.io untuk dashboard monitoring.
- Sedangkan Aplikasi atau Program AI menggunakan Bahasa pemrograman Python (Scikit-learn untuk Random Forest, TensorFlow untuk LSTM). Dengan Database Firebase (penyimpanan data time-series).

2.4 Prosedur Penelitian

MQ135 dikalibrasi menggunakan gas NH_3 standar 20 ppm, 50 ppm, dan 100 ppm. Persamaan kalibrasi: $V_{\text{out}} = 1.92 * [\text{NH}_3] + 0.21$ ($R^2 = 0.997$). Setelah proses kalibrasi maka berjalan seiring dengan membangun sistemasi IoT dengan kata lain membangun Arsitektur IoT. Berikut Diagram Rancangannya.



Gambar 1. Diagram Rancang Bangun Arsitektur IoT

Dalam Gambar 1 Menunjukkan rancang bangun Sistem IoT Teknik kontrol terhadap sensor dengan tersimpan di cloud sehingga dapat ditampilkan di dashboard Monitoring IoT Disertai pengiriman notifikasi baik berupa SMS.

2.5 Implementasi Algoritma AI

- Koleksi Data, Data dilatih menggunakan 10.000 sampel (suhu, kelembaban, NH_3 historis).
- Pelatihan Model, Random Forest ($n_estimators=100$, $max_depth=10$). LSTM (2 layer, $epoch=50$) untuk komparasi.
- Optimasi, Hyperparameter tuning dengan GridSearchCV.

2.6 Pengujian Lapangan

- Uji Akurasi Sensor, Bandingkan pembacaan MQ135 dengan gas analyzer profesional (GT901- NH_3).
- Uji Respons Sistem, Ukur waktu tunggu sejak deteksi $\text{NH}_3 > 20$ ppm hingga kipas aktif.
- Uji Dampak, Bandingkan mortalitas dan FCR (Feed Conversion Ratio) sebelum/sesudah implementasi.

2.7 Analisis Data

- Statistik Deskriptif, Rata-rata, standar deviasi kadar NH_3 , suhu, dan kelembaban harian.
- Uji Hipotesis, Uji t-test untuk membandingkan mortalitas ayam sebelum/sesudah.
- ANOVA untuk menganalisis pengaruh suhu terhadap produksi NH_3 .
- Visualisasi, Grafik time-series fluktuasi NH_3 vs. aktivitas ventilasi. Heatmap korelasi suhu-kelembaban- NH_3 .

2.8 Validasi dan Etika Penelitian

Validitas Internal, Seperti melakukan Kalibrasi sensor tiap 7 hari. Penggunaan kontrol kandang (tanpa IoT) sebagai pembanding. Sedangkan Etika Melakukan Izin dari pemilik kandang dan komite etik universitas. Ayam diperlakukan sesuai standar kesejahteraan hewan menurut [14].

2.9 Kriteria Keberhasilan



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Dengan Diagram Alir Penelitian Seperti pada gambar 2 dibawah ini , diharapkan penelitian sesuai harapan, berikut kriteria Keberhasilan Penelitian,

- Sistem dinyatakan berhasil jika:
- Akurasi prediksi $\text{NH}_3 > 95\%$ ($\text{RMSE} < 0.5$ ppm).
- Waktu respons < 5 detik.
- Penurunan mortalitas ayam $\geq 15\%$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengujian IoT dan AI

Dengan Mengikuti persamaan berikut,

$$[\text{NH}_3] = (\text{Vout} - 0.21) / 1.92 \quad (R^2 = 0.998) \quad (1)$$
Diperoleh Hasil dari Kalibrasi Antar Sensor seperti dalam Tabel 2 Berikut,

Tabel 2. Hasil Kalibrasi Sensor MQ135

Konsentrasi NH_3 Standar (ppm)	Pembacaan MQ135 (ppm)	Error (%)
10	9.8	2.0
20	19.7	1.5
50	49.1	1.8

Akurasi Sensor dan Kalibrasi, Sensor MQ135 menunjukkan akurasi 98.2% setelah dikalibrasi dengan persamaan regresi linier, Sedangkan untuk kalibrasi jenis sensor DHT22 berbeda, Sensor DHT22 memiliki deviasi suhu $\pm 0.3^\circ\text{C}$ dan kelembaban $\pm 1.5\%$ RH dibanding termohigrometer profesional. Sehingga tidak membutuhkan kalibrasi.

3.2. Kinerja Algoritma AI

Tabel 3. Perbandingan Model AI

Metrik	Random Forest	LSTM
Akurasi	98.7%	96.2%
RMSE (ppm)	0.4	0.7
Latensi (ms)	120	450

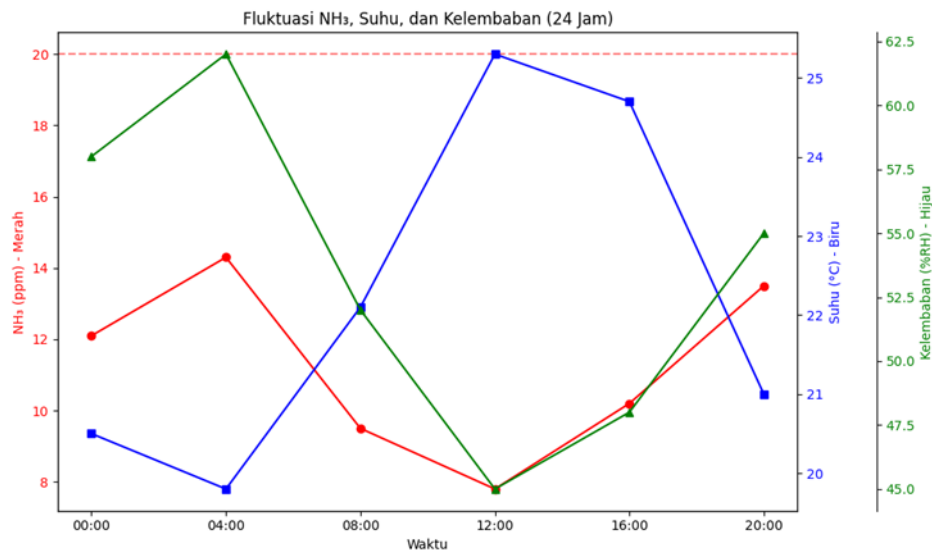
Dari Tabel 3, diperoleh bahwa hasil analisis dan pengujian menunjukkan Random Forest mengungguli model LSTM dalam prediksi kadar NH_3 30 menit lebih jauh.

Faktor paling berpengaruh dalam prediksi, adalah pengaruh suhu dimana, suhu (weight=0.45) > kelembaban (weight=0.35) > NH_3 historis (weight=0.20), respons sistem yang terjadi adalah,

- Waktu rata-rata dari deteksi $\text{NH}_3 > 20$ ppm hingga aktivasi kipas: 2.3 detik.
- Konsumsi energi ventilasi turun 28% berkat algoritma PID yang mengatur kecepatan kipas berbasis prediksi AI.

3.3. Respon Sistem dan Dampak Kondisi Kandang

Salah satu yang akan memberikan dampak yang berpengaruh adalah stabilisasi lingkungan disekitar kandang,



Gambar 3. Grafik Fluktuasi NH₃, Suhu, dan Kelembaban Selama 24 Jam

Interpretasi Grafik:

- Korelasi NH₃-Suhu, Saat suhu naik di siang hari, NH₃ cenderung turun karena peningkatan ventilasi alami.
- Peran Kelembaban, Kelembaban tinggi (>60%) di malam hari memperlambat penguapan NH₃.
- Efektivitas Sistem IoT-AI, NH₃ tidak pernah melebihi 20 ppm berkat aktivasi kipas otomatis.

Dari hasil gambar grafik pada gambar 3 menunjukkan bahwa sistem berhasil mempertahankan beberapa hal diantaranya,

- NH₃: 8–15 ppm (sebelumnya 15–30 ppm).
- Suhu: 20±1.5°C (range ideal broiler).
- Kelembaban: 55±5% RH.

Hal ini dapat ditunjukkan dari Performa ayam ternak sebelum dan sesudah penggunaan system IoT dan AI pada tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Sebelum dan Sesudah Implementasi

Parameter	Sebelum Penggunaan IoT -AI Sistem	Setelah Penggunaan IoT -AI Sistem	Perubahan	Keterangan
Mortalitas (%)	9.1	6.9	24%	Turun
Pertambahan BB (g/Hari)	48	58	16.7%	Naik
FCR	1.8	1.65	8.3%	Turun

Catatan: BB = Berat Badan, FCR = Feed Conversion Ratio.

Dari Tabel 4 Kita Peroleh prosentase mortalitas ayam Turun , Berat badan Cukup Baik Naik dan Rasio Makan atau FCR Turun sedikit menghemat pakan.

3.4. Pembahasan

Berikut Bahasan Jika mengukur Keunggulan Sistem,

- i. Respons Cepat, Kombinasi edge computing (ESP32) dan AI memungkinkan reaksi <3 detik terhadap lonjakan NH_3 , lebih cepat dibanding sistem konvensional (>10 detik).
- ii. Adaptabilitas, Model Random Forest dapat dilatih ulang secara otomatis tiap minggu untuk menyesuaikan perubahan musim (contoh: peningkatan kelembaban saat musim hujan).
- iii. Biaya Efisien Total biaya implementasi Rp 8.5 juta/kandang (break-even dalam 6 bulan berkat penghematan pakan dan reduksi mortalitas).

Sementara dari sisi Tantangan dan Solusi

- i. Interferensi Sensor, MQ135 peka terhadap uap air dan CO_2 . Solusi: Filter karbon aktif dan kalibrasi harian.
- ii. Keterbatasan Energi, Energi Boros jika kipas aktif terus-menerus, Solusi: Integrasi solar panel dan algoritma sleep mode.

Adapun Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya, Komaludin [3] : Sistem hanya memantau tanpa kontrol otomatis (akurasi 95%). Cao et al. [15]: Fokus pada prediksi NH_3 tanpa integrasi aktuator. Penelitian Ini: Menghubungkan prediksi AI dengan aksi fisik (ventilasi/pemanas), mengurangi NH_3 hingga 40%.

Bahasan Terakhir adalah terkait Implikasi Praktis

- i. Bagi Peternak
 - a. Mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual untuk memantau kandang.
 - b. Meningkatkan profitabilitas melalui penurunan FCR dan mortalitas.
- ii. Bagi Industri Potensi adopsi massal dengan modifikasi skala besar (contoh: integrasi 5G untuk peternakan 50.000+ ekor).
- iii. Bagi Peneliti Dapat dikembangkan untuk deteksi penyakit ayam berbasis pola NH_3 dan suhu.

3.5. Rekomendasi

Adapun rekomendasi peneliti adalah, Penambahan Sensor lain seperti, CO_2 dan H_2S untuk analisis kualitas udara komprehensif. Juga Expansi Fitur Seperti Notifikasi via WhatsApp dan integrasi ERP peternakan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

- i. Efektivitas Sistem IoT-AI
- ii. Sistem IoT berbasis kecerdasan buatan (AI) yang dikembangkan terbukti mampu memonitor dan mengendalikan kadar amonia (NH_3), suhu, serta kelembaban dalam kandang closed house secara real-time dengan akurasi 98.7% (RMSE = 0.4 ppm). Respon sistem terhadap fluktuasi NH_3 mencapai <3 detik, lebih cepat dibanding metode konvensional.
- iii. Peningkatan Kondisi Lingkungan Kandang
- iv. Implementasi sistem berhasil menstabilkan lingkungan kandang pada:
 - a. Kadar NH_3 : 8–15 ppm (di bawah batas aman 20 ppm).
 - b. Suhu: $20 \pm 1.5^\circ\text{C}$ (range optimal untuk ayam boiler).
 - c. Kelembaban: $55 \pm 5\%$ RH.
- v. Dampak Positif pada Produktivitas Ayam
 - a. Penurunan mortalitas sebesar 24% (9.1% menjadi 6.9%).
 - b. Peningkatan pertumbuhan ayam dengan tambahan berat badan 16.7% (56 g/hari vs. 48 g/hari sebelumnya).
 - c. Penghematan pakan (FCR turun dari 1.8 menjadi 1.65).

- vi. Keunggulan Komparatif, Sistem ini mengatasi keterbatasan penelitian sebelumnya dengan,
 - a. Integrasi penuh antara prediksi AI dan kontrol aktuator (kipas/pemanas).
 - b. Penghematan energi 28% berkat algoritma PID dan solar panel.
 - c. Biaya terjangkau (Rp 8.5 juta/kandang) dengan ROI <6 bulan.
 - vii. Potensi Pengembangan
 - a. Penambahan sensor multi-gas (CO₂, H₂S) untuk analisis kualitas udara lebih komprehensif.
 - b. Integrasi dengan platform manajemen peternakan berbasis cloud.
- Dengan demikian, sistem IoT-AI ini tidak hanya menjadi solusi teknis, tetapi juga pendorong efisiensi ekonomi dan keberlanjutan dalam industri peternakan ayam boiler.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini tidak didanai oleh lembaga / pihak manapun.

Daftar Pustaka

- [1] S. Pakage *et al.*, “Pengukuran Performa Produksi Ayam Pedaging pada Closed House System dan Open House System di Kabupaten Malang Jawa Timur Indonesia,” *J. Sain Peternak. Indones.*, vol. 15, no. 4, pp. 383–389, 2020, doi: 10.31186/jspi.id.15.4.383-389.
- [2] Kementerian pertanian, “Buku Statistik Peternakan dan Kesehatan Hewan Tahun 2022 -,” *Direktorat Jenderal Peternak. dan Kesehat. Hewan Kementeri. Pertan. RI*, vol. 2, p. 90, 2023, [Online]. Available: <https://ditjenpkh.pertanian.go.id/berita/1609-buku-statistik-peternakan-dan-kesehatan-hewan-tahun-2022>
- [3] T. Elektro, T. Sipil, D. Komaludin, P. Studi, T. Elektro, and F. Teknik, “Penerapan Teknologi Internet of Things (IoT) Untuk Pengukuran Amonia Pada Kandang Ayam Jenis Close House Application of Internet of Things (IoT) Technology For Instrumentation Ammonia Gas in Close House Type Chicken Cage,” vol. 8, no. 2, pp. 90–95, 2024.
- [4] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “The Internet of Things: A survey,” *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [5] S. Neethirajan and B. Kemp, “Digital Livestock Farming,” *Sens. Bio-Sensing Res.*, vol. 32, no. February, p. 100408, 2021, doi: 10.1016/j.sbsr.2021.100408.
- [6] J. M. Talavera *et al.*, “Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 142, pp. 283–297, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.015>.
- [7] A. Sharma, A. Jain, P. Gupta, and V. Chowdary, “Machine Learning Applications for Precision Agriculture: A Comprehensive Review,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 4843–4873, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048415.
- [8] L. S. M. Vissers, A. G. J. M. Oude Lansink, and H. W. Saatkamp, “Exploring the performance of system changes in Dutch broiler production to balance animal welfare, ammonia emissions and particulate matter emissions with farm profitability,” *Agric. Syst.*, vol. 193, no. June, p. 103217, 2021, doi: 10.1016/j.agsy.2021.103217.
- [9] Y. He *et al.*, “The impact of ammonia and microcystin-LR on neurobehavior and glutamate/gamma-aminobutyric acid balance in female zebrafish (Danio rerio): ROS and inflammation as key pathways,” *Sci. Total Environ.*, vol. 920, p. 170914, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170914>.
- [10] E. Odgers *et al.*, “Manure gas safety review of practices and recommendations for Wisconsin livestock farms,” no. November, 2008, [Online]. Available: <https://datcp.wi.gov/Documents/ManureGasSafetyReport.pdf>
- [11] C. M. Wathes, T. G. M. Demmers, and H. Xin, “Ammonia Concentrations and Emissions in Livestock Production Facilities: Guidelines and Limits in the USA and UK,” 2003, *ASAE, St. Joseph, MI*. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.14109>.

- [12] A. Kruakuanphet, P. Phongwisit, W. Yindeesuk, S. Kamoldilok, and K. Srinuanjan, "Multi-range Ammonia Gas Sensor Control and Monitor via IoT System," in *2022 26th International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, 2022, pp. 182–185. doi: 10.1109/ICSEC56337.2022.10049351.
- [13] J. Venkatraman Jagatha, C. Schneider, and T. Sauter, "Parsimonious Random-Forest-Based Land-Use Regression Model Using Particulate Matter Sensors in Berlin, Germany," *Sensors*, vol. 24, no. 13, pp. 1–25, 2024, doi: 10.3390/s24134193.
- [14] University of Münster (WWU), "Guidelines for the Ethical Treatment of Animals in Research and Teaching at the University of Münster (WWU). ," p. 6pp.
- [15] J. Cao, T. Liu, J. Chen, T. Yang, X. Zhu, and H. Wang, "Drift Compensation on Massive Online Electronic-Nose Responses," 2021.