



Framework Smart Mushroom Farming Berbasis IoT dan AI Menggunakan Pendekatan Multimodal untuk Budidaya Jamur Merang

Yenny Desnelita¹, Gustientiedina², Ramalia Noratama Putri³, Alyauma Hajjah⁴, Yulvia Nora Marlim⁵, Irwan⁶

^{1,3,6}Program Studi Sistem Informasi, Fakultas Ilmu Komputer, Institut Bisnis dan Teknologi Pelita Indonesia

^{2,4,5}Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Institut Bisnis dan Teknologi Pelita Indonesia

¹yenny.desnelita@lecturer.pelitaindonesia.ac.id, ²gustientiedina@lecturer.pelitaindonesia.ac.id,

³ramalia.noratamaputri@lecturer.pelitaindonesia.ac.id, ⁴alyauma.hajjah@lecturer.pelitaindonesia.ac.id,

⁵yulvia.nora@lecturer.pelitaindonesia.ac.id, ⁶irwan@lecturer.pelitaindonesia.ac.id

Abstract

*Mushroom (*Volvariella volvacea*) cultivation depends heavily on maintaining a microclimate that aligns with its growth stages, making it necessary to analyze environmental data and visual growth indicators in an integrated manner to support more precise cultivation management. This study proposes a Smart Mushroom Farming framework based on the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) with a multimodal approach to support environmental monitoring alongside growth-phase analysis of *Volvariella volvacea*. The framework was developed through a Design Science Research (DSR) approach and structured into a four-layer architecture, namely the sensing, communication, processing, and application layers. At the data acquisition layer, temperature, relative humidity, CO₂ concentration, light intensity, and substrate moisture are combined with RGB imagery capturing the visual development of the mushrooms. These data are transmitted via the MQTT protocol and managed through a cloud-based database. At the processing layer, the multimodal approach is designed to integrate microclimate features with visual features extracted using a Convolutional Neural Network (CNN), serving as the conceptual basis for identifying growth phases ranging from mycelium, primordia (tiny button), button (egg), and elongation, to the mature or harvest-ready stage. The proposed framework connects data acquisition, IoT communication, multimodal data integration, AI-based analysis, visualization, and microclimate control output within a single interconnected architecture. The main contribution of this study lies in providing a conceptual and technical foundation for the development of an adaptive, data-driven mushroom cultivation system, which can subsequently be examined further through implementation and experimental validation.*

Keywords: *Convolutional Neural Network, Design Science Research, Internet of Things, Mushroom Cultivation, Multimodal Approach, Smart Farming*

Abstrak

Budidaya jamur merang (*Volvariella volvacea*) sangat bergantung pada kestabilan iklim mikro yang selaras dengan tahapan pertumbuhannya, sehingga data lingkungan dan perkembangan visual jamur perlu dianalisis secara terpadu agar pengelolaan budidaya dapat dilakukan secara lebih presisi. Penelitian ini mengusulkan sebuah framework *Smart Mushroom Farming* berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Artificial Intelligence* (AI) dengan pendekatan multimodal untuk mendukung pemantauan lingkungan sekaligus analisis fase pertumbuhan jamur merang. Framework disusun melalui pendekatan *Design Science Research* (DSR) dan diwujudkan dalam arsitektur empat lapisan, yaitu *sensing*, *communication*, *processing*, dan *application layer*. Pada lapisan akuisisi data, parameter suhu, kelembapan relatif, konsentrasi CO₂, intensitas cahaya, dan kelembapan media dipadukan dengan citra RGB perkembangan jamur sebagai representasi kondisi visual. Seluruh data tersebut ditransmisikan melalui protokol MQTT dan dikelola dalam basis data berbasis *cloud*. Pada lapisan pemrosesan, pendekatan multimodal dirancang untuk menggabungkan fitur iklim mikro dengan fitur visual yang diekstraksi menggunakan *Convolutional Neural Network* (CNN), sebagai dasar konseptual bagi identifikasi fase

pertumbuhan mulai dari miselium, primordia (*tiny button*), *button (egg)*, *elongation*, hingga fase matang/siap panen. Framework yang diusulkan menghubungkan tahapan akuisisi data, komunikasi IoT, integrasi data multimodal, analisis berbasis AI, visualisasi, hingga keluaran pengendalian mikroklimat dalam satu arsitektur yang saling terhubung. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyediaan dasar konseptual dan teknis bagi pengembangan sistem budidaya jamur merang yang adaptif dan berbasis data, yang selanjutnya dapat diuji lebih lanjut melalui tahap implementasi dan validasi eksperimental.

Kata kunci: Convolutional Neural Network, Design Science Research, Internet of Things, Jamur Merang, Pendekatan Multimodal, Smart Farming.

© 2026 Author
Creative Commons Attribution 4.0 International License



1. Pendahuluan

Transformasi digital di sektor pertanian telah mendorong berkembangnya paradigma Smart Agriculture, yaitu pengelolaan budidaya berbasis data melalui integrasi Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), computer vision, edge computing, cloud computing, dan analitik data. Integrasi teknologi tersebut memungkinkan kondisi lingkungan direkam, ditransmisikan, dan dianalisis secara real-time sehingga keputusan budidaya dapat didasarkan pada data aktual dan pola yang diperoleh melalui proses analitik. Perkembangan terkini bahkan mengarah pada Artificial Intelligence of Things (AIoT), yang menghubungkan kemampuan IoT dalam mengakuisisi data lapangan dengan AI untuk menghasilkan analisis prediktif dan mendukung pengambilan keputusan adaptif pada sistem pertanian presisi [1][2].

Di Indonesia, implementasi Smart Agriculture berkembang melalui penggunaan sensor IoT, sistem monitoring berbasis web, otomasi penyiraman, serta aplikasi bergerak untuk mendukung pengelolaan budidaya [3][4][5][6]. Pada budidaya jamur, penerapan IoT juga menunjukkan manfaat dalam pemantauan kondisi lingkungan dan pengendalian faktor budidaya secara berkelanjutan [7]. Studi terbaru di Indonesia menunjukkan bahwa sistem IoT semiotomatis dapat menyediakan informasi lingkungan secara real-time dan memengaruhi praktik pengelolaan budidaya oleh petani [8]. Meskipun demikian, sebagian besar implementasi tersebut masih berorientasi pada fungsi monitoring dan otomasi, sedangkan pemanfaatan data sensor bersama informasi visual sebagai masukan bagi AI masih relatif terbatas.

Kebutuhan integrasi teknologi menjadi semakin relevan pada budidaya jamur merang (*Volvariella volvacea*) karena perkembangan jamur dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, karakteristik substrat, dan faktor fisik selama proses budidaya. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa variasi parameter fisikokimia berhubungan dengan hasil dan efisiensi biologis *V. volvacea* [9]. Sedangkan kondisi kultur dan faktor fisik turut memengaruhi perkembangan miselium [10]. Temuan tersebut memperlihatkan

pentingnya memperoleh informasi lingkungan secara kontinu sebagai dasar untuk memahami dinamika pertumbuhan jamur. Dalam konteks ini, IoT mendukung akuisisi data sensor secara real-time, komunikasi jaringan, penyimpanan berbasis cloud, serta penyajian informasi melalui dashboard web maupun perangkat bergerak [11].

Sejumlah penelitian telah mengembangkan sistem budidaya jamur berbasis IoT menggunakan sensor suhu dan kelembapan, kualitas udara, intensitas cahaya, serta mikrokontroler yang terhubung dengan jaringan komunikasi dan layanan cloud [11][12]. Pengembangan berikutnya mulai mengintegrasikan logika cerdas dalam pengendalian lingkungan. Misalnya, menggabungkan IoT dan fuzzy logic untuk pengelolaan kondisi substrat pada budidaya jamur. Pendekatan tersebut menunjukkan pergeseran dari monitoring menuju pengendalian yang lebih responsif terhadap data [13]. Namun, sebagian sistem masih bertumpu pada data lingkungan dan aturan pengendalian, sehingga perubahan visual jamur selama proses pertumbuhan belum menjadi bagian utama dalam analisis sistem.

Di sisi lain, AI telah digunakan dalam penelitian jamur melalui machine learning, deep learning, dan computer vision. Rahman et al. [14]. mengintegrasikan otomasi berbasis IoT dengan machine learning untuk klasifikasi jamur, sedangkan Lee et al. [15]. menerapkan machine learning berbasis citra melalui aplikasi telepon pintar untuk mendukung klasifikasi jamur. Perkembangan dataset juga mulai menghubungkan citra jamur dengan konteks lingkungan. Duman et al. [16]. menyediakan dataset citra jamur tiram beranotasi yang dilengkapi informasi lingkungan untuk mendukung pengembangan aplikasi machine learning. Kajian Jacob et al. [17] selanjutnya menunjukkan bahwa AI telah berkembang untuk berbagai kebutuhan, mulai dari klasifikasi, pemuliaan, analisis pertumbuhan, hingga pengelolaan budidaya jamur.

Perkembangan tersebut membuka peluang penggunaan pendekatan multimodal, yaitu pemanfaatan lebih dari satu sumber data untuk merepresentasikan proses pertumbuhan. Dalam

konteks Smart Mushroom Farming, data mikroklimat dapat menggambarkan kondisi lingkungan tempat jamur berkembang, sedangkan citra RGB memberikan informasi mengenai bentuk, ukuran, tekstur, dan perubahan morfologi tubuh buah. Kedua modalitas tersebut bersifat saling melengkapi karena perubahan visual tidak berlangsung secara terpisah dari kondisi lingkungan. Kajian terkini mengenai Smart Mushroom Farming juga menunjukkan arah perkembangan menuju integrasi sensor, data, robotika, AI, dan teknologi digital lainnya dalam sistem budidaya yang semakin terhubung secara optimal sebagai dasar pengendalian budidaya [18].

Berdasarkan telaah literatur lima tahun terakhir, masih terdapat tiga kesenjangan penelitian. Pertama, sebagian besar sistem IoT masih berorientasi pada pemantauan lingkungan dan pengendalian berbasis nilai ambang (*threshold-based control*), sehingga belum mampu menyesuaikan strategi pengendalian sesuai dinamika pertumbuhan jamur. Kedua, implementasi AI lebih banyak difokuskan pada

klasifikasi citra atau identifikasi spesies tanpa memanfaatkan data mikroklimat secara simultan untuk meningkatkan akurasi prediksi pertumbuhan. Ketiga, integrasi data sensor lingkungan dan citra digital dalam satu platform yang mampu melakukan prediksi pertumbuhan sekaligus pengendalian mikroklimat secara adaptif masih sangat terbatas. Kesenjangan tersebut menunjukkan perlunya pengembangan sistem Smart Mushroom Farming yang mengintegrasikan IoT dan AI secara menyeluruh agar mampu mendukung budidaya jamur presisi.

Untuk memperjelas posisi penelitian ini terhadap perkembangan tersebut, karakteristik penelitian terdahulu dibandingkan berdasarkan objek, sumber data, pemanfaatan IoT, AI, citra, integrasi multimodal, dan fungsi utama sistem. Komparasi ini digunakan untuk menunjukkan secara eksplisit ruang penelitian yang belum sepenuhnya dijawab oleh studi sebelumnya, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komparasi Penelitian Terdahulu dan Posisi Framework yang Diusulkan

Penelitian	Fokus/Objek	IoT/ Mikroklimat	AI/ Analitik	Citra	Multimodal Sensor–Citra	Fungsi Utama
Chong et al. [11]	Budidaya jamur berbasis IoT	✓	–	✓	–	Monitoring dan pengendalian lingkungan
Al-Talib et al. [12]	Smart mushroom growing kit	✓	–	–	–	Monitoring kondisi budidaya
Irwanto et al. [13]	Pengelolaan lingkungan/substrat jamur	✓	Fuzzy Logic	–	–	Monitoring dan pengendalian lingkungan
Rahman et al. [14]	Otomasi dan klasifikasi jamur	✓	ML	–	–	Otomasi dan klasifikasi
Lee et al. [15]	Identifikasi/klasifikasi jamur	–	ML	✓	–	Klasifikasi berbasis citra
Duman et al. [16]	Dataset jamur dengan konteks lingkungan	Konteks lingkungan	ML	✓	Sebagian	Dataset untuk pengembangan ML
Jacob et al. [17]	Kajian AI pada budidaya dan klasifikasi jamur	Beragam	AI	✓	Beragam	Kajian aplikasi AI
Yang & Argyropoulos [18]	Smart Mushroom Farming	✓	AI	✓	Arah integrasi	Kajian sensor, AI, robotika, dan data
Framework diusulkan	yang V. volvacea	Suhu, RH, CO ₂ , cahaya, kelembapan media	CNN + data sensor	RGB	✓	Akuisisi, fusi multimodal, analisis fase, visualisasi, dan output pengendalian

Keterangan: ✓ = digunakan/dibahas sebagai komponen utama; – = tidak menjadi komponen utama berdasarkan fokus penelitian yang dibandingkan.

Tabel 1 memperlihatkan bahwa penelitian sebelumnya telah memberikan fondasi penting bagi perkembangan Smart Mushroom Farming, tetapi fokus integrasinya berbeda. Sistem IoT pada [11][12][13] terutama diarahkan pada pemantauan dan pengelolaan lingkungan, sedangkan penelitian berbasis AI pada [14][15] lebih menekankan fungsi klasifikasi. Dataset yang dikembangkan Duman et al. [16] mulai menghubungkan citra dengan konteks lingkungan, sementara kajian terbaru [17][18] menunjukkan kecenderungan menuju integrasi teknologi yang lebih luas. Meskipun demikian, masih terbatas penelitian yang secara khusus menempatkan data mikroklimat dan citra pertumbuhan sebagai dua modalitas yang dipadukan dalam satu framework IoT–AI untuk budidaya jamur merang (*Volvariella volvacea*).

Komparasi penelitian terdahulu pada Tabel 1 memperlihatkan tiga kesenjangan utama dalam pengembangan *Smart Mushroom Farming*. Pertama, pemanfaatan IoT pada budidaya jamur masih didominasi oleh fungsi pemantauan dan pengendalian lingkungan, sementara data mikroklimat belum banyak dipadukan dengan informasi visual untuk merepresentasikan dinamika pertumbuhan jamur. Kedua, penerapan AI dan *computer vision* cenderung berfokus pada klasifikasi atau identifikasi berbasis citra, tanpa menjadikan kondisi mikroklimat sebagai bagian terpadu dari masukan model. Ketiga, masih terbatas *framework* yang menyatukan akuisisi data sensor, citra RGB, komunikasi IoT, penyimpanan *cloud*, fusi multimodal, analisis AI, visualisasi, dan keluaran pengendalian dalam satu arsitektur, khususnya untuk budidaya jamur merang (*Volvariella volvacea*). Kesenjangan tersebut membuka ruang pengembangan *framework* IoT–AI multimodal yang menghubungkan kondisi mikroklimat dengan perubahan visual pertumbuhan jamur secara terintegrasi, sehingga data lingkungan dan citra dapat dimanfaatkan sebagai sumber informasi yang saling melengkapi dalam mendukung analisis perkembangan *V. volvacea*.

Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan mengusulkan framework Smart Mushroom Farming berbasis Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligence (AI) dengan pendekatan multimodal untuk mendukung budidaya jamur merang (*Volvariella volvacea*) berbasis data. Framework dirancang untuk mengintegrasikan data mikroklimat *real-time*, meliputi suhu, kelembapan relatif, konsentrasi CO₂, intensitas cahaya, dan kelembapan media, dengan citra RGB yang merepresentasikan perubahan visual selama pertumbuhan jamur. Novelty penelitian terletak pada fusi data mikroklimat dan fitur visual berbasis

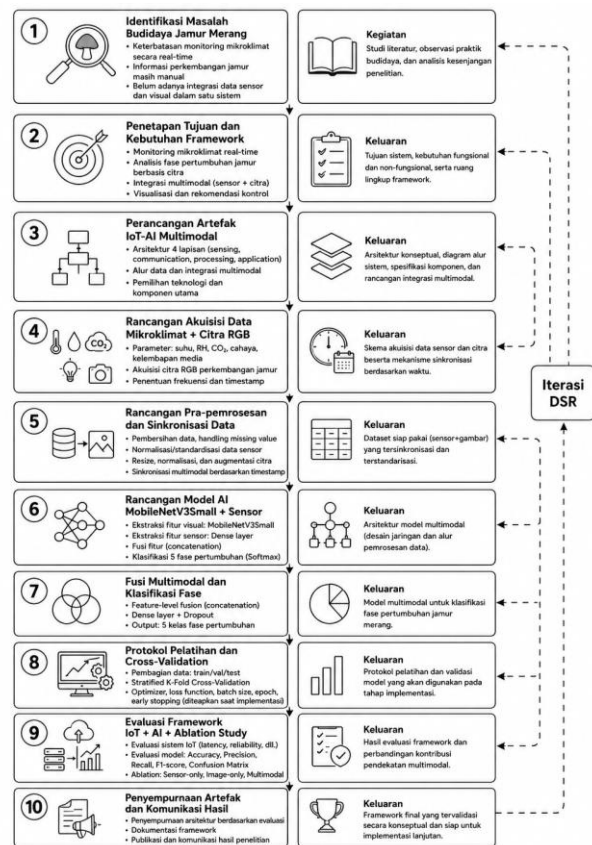
Convolutional Neural Network (CNN) dalam satu arsitektur IoT–AI, sehingga analisis fase pertumbuhan tidak hanya bertumpu pada karakteristik citra atau kondisi lingkungan secara terpisah. Keterbaruan yang ditawarkan dibandingkan penelitian terdahulu adalah penyatuan fungsi akuisisi data, komunikasi IoT, penyimpanan, fusi multimodal, analisis AI, visualisasi, dan keluaran pengendalian mikroklimat dalam satu alur terintegrasi. Dengan pendekatan tersebut, framework yang diusulkan memberikan dasar konseptual dan teknis bagi pengembangan Smart Mushroom Farming yang menghubungkan kondisi mikroklimat dengan dinamika visual pertumbuhan *V. volvacea* serta menyediakan landasan untuk implementasi dan validasi eksperimental pada penelitian selanjutnya.

2. Metode Penelitian

2.1 Desain dan Posisi Penelitian

Penelitian ini menggunakan Design Science Research (DSR) sebagai kerangka metodologis untuk merancang artefak berupa Framework Smart Mushroom Farming berbasis Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligence (AI) dengan pendekatan multimodal pada budidaya jamur merang (*Volvariella volvacea*). Pemilihan DSR didasarkan pada karakter penelitian yang berorientasi pada penyelesaian masalah melalui perancangan artefak, evaluasi, dan penyempurnaan secara iteratif. Dalam penelitian ini, artefak tidak diposisikan sebagai sistem produksi yang telah tervalidasi penuh, melainkan sebagai framework konseptual-teknis yang menghubungkan data mikroklimat dan citra pertumbuhan dalam satu alur IoT–AI. DSR relevan digunakan karena memungkinkan artefak digital dirancang, didemonstrasikan, dievaluasi, dan disempurnakan secara iteratif dalam satu kerangka penelitian [19].

Tahapan penelitian mengadaptasi enam aktivitas DSR, yaitu identifikasi masalah dan motivasi, perumusan tujuan solusi, perancangan dan pengembangan artefak, demonstrasi, evaluasi, serta komunikasi. Identifikasi masalah diarahkan pada keterbatasan sistem budidaya jamur yang masih memisahkan pemantauan lingkungan dan analisis visual. Tujuan solusi diterjemahkan menjadi rancangan framework multimodal. Tahap perancangan menyusun arsitektur empat lapisan dan mekanisme fusi data. Demonstrasi dilakukan melalui alur kerja dan skenario penggunaan. Evaluasi pada tahap penelitian ini menilai konsistensi arsitektur dan menyiapkan protokol validasi kuantitatif untuk implementasi berikutnya yang dapat dijelaskan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur kerja penelitian berbasis Design Science Research pada Framework Smart Mushroom Farming

2.2 Objek Kajian dan Variabel Multimodal

Objek kajian adalah budidaya jamur merang pada kumbung, dengan dua modalitas utama, yaitu data mikroklimate dan citra RGB. Data mikroklimate dirancang mencakup suhu, kelembapan relatif, konsentrasi CO₂, intensitas cahaya, dan kelembapan media. Modalitas visual berupa citra RGB digunakan untuk merepresentasikan perubahan morfologi selama pertumbuhan. Penggabungan kedua sumber data dipilih karena sensor memberikan konteks lingkungan, sedangkan citra menunjukkan perubahan fisik yang tidak dapat direpresentasikan secara langsung oleh data numerik. Pendekatan serupa pada prediksi pertumbuhan tanaman menunjukkan bahwa fusi data citra dan sensor dapat digunakan untuk membangun representasi pertumbuhan yang lebih kontekstual dibandingkan penggunaan satu modalitas [20].

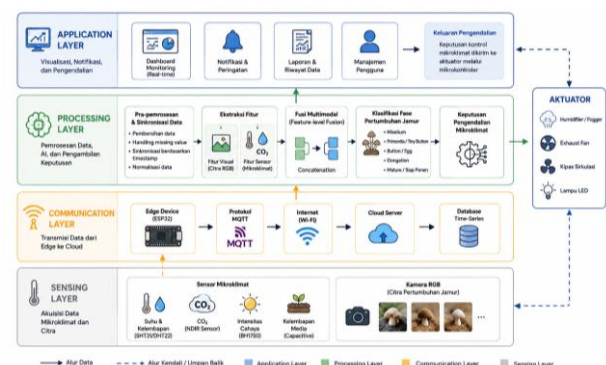
2.3 Arsitektur Framework IoT-AI

Framework ini dirancang dalam empat lapisan, yaitu sensing layer, communication layer, processing layer, dan application layer. Sensing layer mengakuisisi data mikroklimate dan citra secara paralel. ESP32 ditempatkan sebagai edge device untuk membaca sensor dan mengirimkan data. Communication layer menggunakan konektivitas Wi-Fi dan protokol MQTT untuk meneruskan data menuju penyimpanan berbasis cloud. Processing layer menangani pembersihan data, sinkronisasi

berdasarkan timestamp, ekstraksi fitur visual, pembentukan fitur sensor, fusi multimodal, dan klasifikasi fase pertumbuhan. Application layer menyajikan kondisi mikroklimate, status fase pertumbuhan, notifikasi, serta keluaran yang dapat digunakan sebagai masukan pengendalian mikroklimate. Arsitektur berlapis dipilih agar setiap fungsi dapat dikembangkan dan diuji secara modular sebagaimana dirangkum pada Gambar 2.

Rancangan tersebut mengikuti arah pengembangan sistem budidaya jamur terkini. Sistem IoT telah digunakan untuk monitoring dan otomasi lingkungan budidaya secara real-time, sedangkan pendekatan fuzzy telah memanfaatkan data multisensor untuk pengelolaan substrat dan lingkungan [7][13]. Framework penelitian ini memperluas pola tersebut dengan menempatkan data mikroklimate sebagai salah satu modalitas yang dipadukan dengan fitur citra pada lapisan pemrosesan.

Hubungan antarlapisan divisualisasikan pada Gambar 2. Data bergerak dari lapisan akuisisi menuju komunikasi dan penyimpanan, kemudian diproses melalui fusi multimodal sebelum disajikan pada lapisan aplikasi. Pemisahan fungsi ini menjaga keterlacakan aliran data sekaligus memudahkan evaluasi setiap komponen framework secara modular.



Gambar 2. Arsitektur Empat Lapisan Framework Smart Mushroom Farming berbasis IoT dan AI

2.4 Perangkat Akuisisi dan Pengendalian

Tabel 2. Komponen akuisisi dan pengendalian pada Framework Smart Mushroom Farming

Komponen	Parameter/Fungsi	Peran dalam Framework	Status
ESP32	Akuisisi dan komunikasi	Edge device dan pengiriman data MQTT	Diusulkan
SHT31/DHT22	Suhu dan kelembapan relatif	Konteks mikroklimate	Diusulkan
NDIR CO ₂	Konsentrasi CO ₂	Konteks ventilasi dan kualitas udara	Diusulkan
BH1750	Intensitas cahaya	Konteks pencahayaan kumbung	Diusulkan
Sensor kapasitif	Kelembapan media	Konteks kondisi	Diusulkan

Kamera RGB	Citra pertumbuhan	media Sumber fitur visual	Diusulkan
Humidifier/Fogger	Kelembapan udara	Aktuator pengendalian RH	Diusulkan
Exhaust fan	Pertukaran udara	Aktuator ventilasi/CO ₂	Diusulkan
Kipas sirkulasi	Distribusi udara	Mengurangi gradien mikroklimat	Diusulkan
Lampu LED	Pencahayaan	Aktuator pencahayaan	Diusulkan

Pemilihan komponen bersifat rancangan awal dan harus disesuaikan dengan perangkat yang benar-benar digunakan ketika implementasi dilakukan. Prinsip ini penting agar spesifikasi metode tetap dapat direplikasi. Studi budidaya jamur berbasis IoT terbaru memperlihatkan penggunaan sensor lingkungan, otomasi, dan pengelolaan data sebagai komponen utama ruang budidaya terkendali [7][13].

2.5 Protokol Penyusunan Dataset Multimodal

Dataset dirancang sebagai pasangan data sensor dan citra yang memiliki penanda waktu yang sama. Setiap rekaman terdiri atas vektor mikroklimat dan citra RGB yang merepresentasikan kondisi jamur pada waktu pengamatan. Citra akan dikelompokkan ke dalam lima fase perkembangan, yaitu miselium, primordia/tiny button, button/egg, elongation, dan mature/siap panen. Pelabelan direncanakan berdasarkan catatan waktu budidaya dan ciri morfologi, kemudian diverifikasi oleh penilai yang memahami budidaya jamur merang. Untuk mengurangi ketergantungan antarsampel, data sebaiknya dikumpulkan dari lebih dari satu siklus budidaya dan, bila memungkinkan, dari posisi rak atau kondisi kumbung yang bervariasi.

Jumlah citra tidak ditetapkan sebagai data aktual pada tahap framework. Sebagai protokol implementasi, pengumpulan diarahkan agar setiap kelas memiliki representasi yang memadai dan tidak timpang. Jumlah citra per kelas, jumlah siklus, interval akuisisi, sumber data, serta distribusi kelas wajib dilaporkan setelah dataset tersedia. Citra sekunder, apabila digunakan, harus memiliki lisensi dan karakteristik yang sesuai serta dipisahkan pencatatannya dari data primer.

2.6 Pra-pemrosesan dan Sinkronisasi

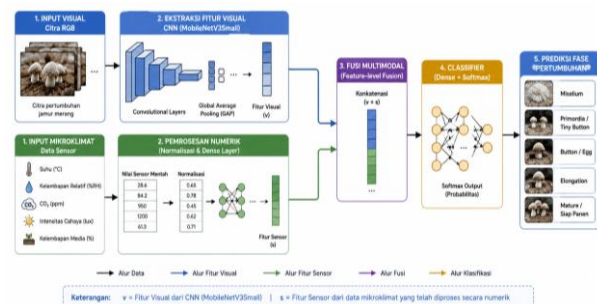
Pra-pemrosesan citra meliputi pemeriksaan kualitas, penghapusan duplikasi, penyeragaman ukuran masukan, dan normalisasi. Augmentasi hanya diterapkan pada data latih agar tidak terjadi kebocoran informasi ke data validasi atau pengujian. Transformasi yang direncanakan berupa rotasi ringan, translasi, zoom, penyesuaian kecerahan, dan horizontal flip apabila transformasi tersebut tidak mengubah ciri biologis yang menentukan fase. Data sensor diperiksa terhadap nilai hilang, pembacaan tidak wajar, dan perbedaan skala antarfitur, kemudian dinormalisasi atau distandarisasi menggunakan parameter yang dihitung dari data latih. Pasangan sensor-citra dibentuk menggunakan

timestamp atau jendela waktu terdekat yang ditetapkan sebelum pelatihan.

2.7 Rancangan Model AI

Cabang visual diusulkan menggunakan MobileNetV3Small berbasis transfer learning sebagai kandidat backbone CNN karena arsitektur ringan lebih sesuai untuk arah implementasi pada lingkungan edge/IoT. Backbone menerima citra yang telah dipra-proses dan menghasilkan representasi fitur melalui lapisan konvolusional yang diikuti Global Average Pooling. Lapisan klasifikasi akhir kemudian disesuaikan dengan lima kelas fase pertumbuhan. Pemilihan MobileNetV3Small merupakan hipotesis desain, bukan pernyataan bahwa arsitektur tersebut telah terbukti paling akurat pada dataset jamur merang. Pemilihan keluarga MobileNetV3 didukung oleh penelitian pertanian terkini yang menunjukkan bahwa arsitektur ringan tersebut sesuai untuk klasifikasi citra dan arah implementasi pada perangkat dengan sumber daya komputasi terbatas [21].

Cabang sensor menerima fitur suhu, kelembapan relatif, CO₂, intensitas cahaya, dan kelembapan media. Data numerik diproses melalui lapisan fully connected untuk menghasilkan representasi fitur sensor. Fitur visual dan fitur sensor selanjutnya digabungkan menggunakan feature-level fusion melalui concatenation. Vektor gabungan diteruskan ke lapisan fully connected dan Softmax untuk menghasilkan probabilitas lima kelas. Skema ini membentuk alur citra terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Alur Pemrosesan Multimodal: Citra RGB dan Data Mikroklimat Menuju Prediksi Fase Pertumbuhan Jamur Merang

2.8 Protokol Pelatihan yang Diusulkan

Pelatihan dilakukan setelah dataset aktual selesai dikumpulkan, dikurasi, dan diberi label. Pemisahan data dirancang pada tingkat siklus budidaya atau kelompok akuisisi, bukan sekadar pengacakan citra, untuk mengurangi risiko data leakage akibat citra berurutan yang sangat mirip. Adam dapat digunakan sebagai optimizor awal dan categorical cross-entropy sebagai fungsi loss untuk klasifikasi multikelas. Learning rate, batch size, jumlah epoch, dropout, serta jumlah blok backbone yang dibuka saat fine-tuning diperlakukan sebagai hyperparameter yang ditentukan melalui eksperimen. Early stopping dan model checkpoint digunakan berdasarkan performa

data validasi. Dengan demikian, konfigurasi seperti 50 epoch atau batch size 32 dapat digunakan sebagai titik awal pengujian, tetapi tidak dilaporkan sebagai konfigurasi final sebelum eksperimen selesai.

2.9 Protokol Evaluasi AI dan Kontribusi Multimodal
 Evaluasi model dirancang menggunakan accuracy, precision, recall, F1-score, dan confusion matrix. Precision, recall, dan F1-score dilaporkan per kelas serta dalam bentuk macro-average agar interpretasi tidak hanya mengikuti kelas yang dominan. Confusion matrix digunakan untuk mengidentifikasi pasangan fase yang paling sering tertukar, khususnya pada fase pertumbuhan yang memiliki kemiripan morfologi. Stabilitas model dinilai melalui Stratified K-Fold cross-validation; lima fold dapat digunakan sebagai rancangan awal apabila ukuran dan struktur dataset memungkinkan.

Kontribusi pendekatan multimodal diuji melalui ablation study dengan tiga konfigurasi: sensor-only, image-only, dan multimodal. Ketiga konfigurasi harus menggunakan pembagian data dan metrik evaluasi yang setara. Perbandingan ini diperlukan agar manfaat fusi data tidak hanya dinyatakan secara konseptual, tetapi dapat diuji secara empiris. Pendekatan fusi citra dan sensor telah digunakan pada penelitian prediksi pertumbuhan tanaman, yang memperkuat kebutuhan perbandingan terhadap model unimodal [20].

Tabel 3. Rancangan ablation study untuk evaluasi kontribusi multimodal

Konfigurasi	Input	Tujuan Evaluasi
Sensor-only	Mikroklimat	Mengukur informasi prediktif dari kondisi lingkungan
Image-only	Citra RGB	Mengukur informasi prediktif dari morfologi
Multimodal	Mikroklimat + citra RGB	Mengukur nilai tambah fusi dua modalitas

2.10 Evaluasi Framework IoT-AI

Evaluasi artefak dilakukan pada dua tingkat. Pada tingkat arsitektur, evaluasi memeriksa konsistensi hubungan antarlapisan, aliran data, kompatibilitas komponen, dan keterlacakan data dari sensor atau kamera sampai keluaran aplikasi. Pada tingkat implementasi, indikator IoT yang dapat diukur meliputi keberhasilan transmisi data, latency, packet loss, kontinuitas penyimpanan, dan ketepatan sinkronisasi sensor-citra. Sistem budidaya jamur berbasis IoT terbaru menunjukkan pentingnya monitoring real-time dan otomasi lingkungan, sehingga indikator komunikasi dan kontinuitas data perlu dipisahkan dari evaluasi akurasi AI [7][13].

Hasil evaluasi digunakan sebagai umpan balik pada siklus DSR. Apabila ditemukan ketidaksesuaian, penyempurnaan dapat dilakukan pada penempatan sensor, interval akuisisi, mekanisme komunikasi, skema sinkronisasi, representasi fitur, atau strategi

fusi. Dengan demikian, framework tidak dinilai hanya dari performa klasifikasi, tetapi juga dari kemampuan arsitektur mempertahankan aliran data yang dapat digunakan secara konsisten untuk analisis multimodal.

2.11 Batasan Metodologis

Metode ini secara sengaja membedakan antara rancangan yang diusulkan dan hasil yang telah dibuktikan. Pada tahap framework, jumlah citra, nilai accuracy, precision, recall, F1-score, hyperparameter terbaik, dan peningkatan kinerja akibat fusi multimodal belum boleh dinyatakan sebagai temuan. Klaim tersebut baru dapat dibuat setelah pengumpulan dataset dan validasi eksperimental selesai. Pembatasan ini menjaga kesesuaian antara tujuan penelitian, tingkat kematangan artefak, dan bukti yang tersedia, sekaligus menyediakan protokol yang cukup rinci untuk direplikasi pada tahap implementasi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Framework Smart Mushroom Farming Berbasis IoT dan AI

Penelitian ini menghasilkan framework Smart Mushroom Farming berbasis IoT dan AI yang mengintegrasikan data mikroklimat dan citra RGB untuk mendukung analisis pertumbuhan jamur merang (*Volvariella volvacea*). Framework disusun dalam empat lapisan, yaitu *sensing*, *communication*, *processing*, dan *application layer*, yang membentuk alur terintegrasi dari akuisisi data hingga penyajian informasi dan keluaran pengendalian. Pada *sensing layer*, parameter suhu, kelembapan relatif, CO₂, intensitas cahaya, dan kelembapan media direkam bersama citra RGB. Data tersebut kemudian diteruskan melalui ESP32, jaringan Wi-Fi, dan protokol MQTT menuju penyimpanan berbasis *cloud*. Data sensor dan citra disinkronkan berdasarkan waktu akuisisi agar dapat digunakan sebagai pasangan data multimodal. Rancangan keseluruhan framework ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Framework IoT-AI Multimodal untuk Budidaya Jamur Merang

Gambar 4 menunjukkan bahwa *processing layer* menjadi penghubung utama antara data mikroklimat dan informasi visual. Citra RGB diproses melalui CNN dengan MobileNetV3Small sebagai kandidat

backbone untuk memperoleh fitur visual, sedangkan data mikroklimat diolah sebagai fitur numerik. Kedua representasi tersebut digabungkan melalui *feature-level fusion* menggunakan mekanisme *concatenation*, kemudian diteruskan ke *classifier* untuk memprediksi fase pertumbuhan jamur merang. Hasil prediksi selanjutnya disajikan pada *application layer* sebagai informasi pemantauan, prediksi fase, notifikasi, dan rekomendasi tindakan yang dapat mendukung pengelolaan mikroklimat.

Framework tersebut membentuk hubungan berkelanjutan antara akuisisi data, komunikasi, pemrosesan multimodal, prediksi, penyajian informasi, pengendalian. Dengan struktur ini, data IoT tidak hanya digunakan untuk memantau kondisi kumbung, tetapi menjadi informasi kontekstual yang dipadukan dengan karakteristik visual pertumbuhan jamur. Kontribusi utama framework terletak pada integrasi kedua modalitas tersebut dalam satu alur analisis untuk mendukung prediksi fase pertumbuhan *V. volvacea*.

MobileNetV3Small dan mekanisme fusi yang diusulkan masih memerlukan validasi menggunakan dataset aktual sebelum keunggulan kinerja prediksi dapat dinyatakan secara kuantitatif.

3.2 Integrasi Data Multimodal dan Prediksi Fase

Integrasi multimodal dilakukan dengan menyelaraskan data mikroklimat dan citra RGB berdasarkan *timestamp* pengamatan. Citra merepresentasikan perubahan bentuk, ukuran, tekstur, dan morfologi jamur, sedangkan data suhu, kelembapan relatif, CO₂, intensitas cahaya, dan kelembapan media memberikan konteks lingkungan pada saat citra diperoleh. Kedua modalitas diproses melalui jalur yang berbeda, kemudian fitur visual dan fitur sensor digabungkan menggunakan *feature-level fusion* sebagai masukan bagi proses klasifikasi. Framework diarahkan untuk mengenali lima fase pertumbuhan jamur merang, yaitu *miselium*, *primordia/tiny button*, *button/egg*, *elongation*, dan *mature/siap panen*. Integrasi kedua sumber data memungkinkan prediksi mempertimbangkan perubahan morfologi sekaligus kondisi mikroklimat yang menyertainya. Pendekatan ini menjadi pembeda dari model *image-only* dan *sensor-only*. Namun, kontribusi setiap modalitas terhadap kinerja klasifikasi masih perlu dibuktikan melalui *ablation study* dengan membandingkan ketiga konfigurasi tersebut pada dataset dan skema evaluasi yang sama.

3.3 Monitoring dan Keluaran Pengendalian Mikroklimat

Hasil analisis pada *application layer* dirancang untuk disajikan melalui dashboard dan aplikasi bergerak. Informasi yang ditampilkan mencakup kondisi mikroklimat, prediksi fase pertumbuhan, notifikasi, riwayat data, dan status sistem. Dengan mekanisme ini, data hasil pengukuran tidak berhenti sebagai nilai sensor, tetapi diolah menjadi informasi

yang lebih relevan untuk mendukung pengelolaan budidaya jamur merang.

Framework juga menghubungkan hasil analisis dengan *humidifier/fogger*, *exhaust fan*, kipas sirkulasi, dan lampu LED. Hubungan tersebut membentuk alur *sensing-processing-prediction-decision-actuation*, dengan hasil prediksi fase digunakan sebagai informasi tambahan dalam menentukan tindakan pengendalian mikroklimat. Pada tahap penelitian ini, mekanisme tersebut masih merupakan rancangan keluaran framework. Efektivitasnya dalam menjaga kondisi lingkungan maupun mendukung budidaya belum dinyatakan sebagai hasil dan memerlukan pengujian pada kumbung aktual.

3.4 Kontribusi dan Validasi Framework

Kontribusi utama penelitian adalah framework IoT–AI yang mengintegrasikan data mikroklimat dan citra RGB secara temporal untuk mendukung prediksi fase pertumbuhan jamur merang. Data dari kedua modalitas diproses sesuai karakteristiknya sebelum digabungkan pada tingkat fitur. Integrasi tersebut membentuk hubungan yang jelas antara kondisi lingkungan, perubahan morfologi, prediksi fase pertumbuhan, penyajian informasi, dan keluaran pengendalian.

Keterbaruan framework terletak pada mekanisme integrasi mikroklimat–citra dalam satu alur IoT–AI multimodal untuk budidaya *V. volvacea*, bukan pada klaim peningkatan akurasi atau produktivitas yang belum dibuktikan secara eksperimental. Posisi ini penting agar kontribusi penelitian tetap konsisten dengan ruang lingkup penelitian berbasis DSR dan status framework sebagai artefak yang diusulkan. Validasi selanjutnya dilakukan pada dua aspek. Kinerja model dievaluasi menggunakan *accuracy*, *precision*, *recall*, *F1-score*, dan *confusion matrix*, disertai *ablation study* untuk membandingkan *sensor-only*, *image-only*, dan multimodal. Kinerja IoT dievaluasi melalui keberhasilan transmisi, *latency*, *packet loss*, kontinuitas penyimpanan, dan ketepatan sinkronisasi sensor–citra. Pengujian pada beberapa siklus budidaya diperlukan untuk menilai konsistensi dan kemampuan generalisasi framework pada kondisi lingkungan yang berbeda.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan Framework Smart Mushroom Farming berbasis IoT dan AI dengan pendekatan multimodal untuk budidaya jamur merang (*Volvariella volvacea*). Framework menggunakan arsitektur empat lapisan, yaitu *sensing*, *communication*, *processing*, dan *application layer*, yang mengintegrasikan akuisisi data mikroklimat dan citra RGB, komunikasi IoT, sinkronisasi data, pemrosesan multimodal, prediksi fase pertumbuhan, penyajian informasi, serta

keluaran pengendalian mikroklimat dalam satu alur sistem.

Kontribusi utama framework terletak pada fusi data mikroklimat dan fitur visual untuk mendukung prediksi lima fase pertumbuhan jamur merang. Rancangan ini menjadi dasar konseptual dan teknis bagi pengembangan Smart Mushroom Farming yang menghubungkan kondisi lingkungan dengan perubahan morfologi jamur. Validasi menggunakan dataset aktual dan pengujian *sensor-only*, *image-only*, serta multimodal masih diperlukan untuk menilai kinerja dan kemampuan generalisasi framework.

Daftar Rujukan

- [1] T. Miller, G. Mikiciuk, I. Durlik, and M. Mikiciuk, "The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now — A Systematic Review of Smart Sensing Technologies," *Sensor*, vol. 25, pp. 1–32, 2025.
- [2] D. Muhammed, E. Ahvar, S. Ahvar, M. Trocan, and M. Montpetit, "Journal of Network and Computer Applications Artificial Intelligence of Things (AIoT) for smart agriculture : A review of architectures , technologies and solutions," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 228, no. July 2023, p. 103905, 2024, doi: 10.1016/j.jnca.2024.103905.
- [3] A. Ambarwari and A. W. Dewi Kania Widyawati, "Sistem Pemantau Kondisi Lingkungan Pertanian Tanaman Pangan dengan NodeMCU ESP8266 dan Raspberry Pi Berbasis IoT," *J. RESTI (Rekayasa Sist. dan Teknol. Informasi)*, vol. 1, no. 10, pp. 496–503, 2021.
- [4] I. Ruslianto, R. Uray, and Hirzen Hasfani, "Sistem Pintar Untuk Anggur (Sipunggur) pada Kawasan Tropis Berbasis Internet of Things (IoT)," *JEPIN (Jurnal Edukasi dan Penelit. Inform.)*, vol. 8, no. 1, pp. 121–127, 2022.
- [5] S. Dwiyatno, E. Krisnaningsih, and D. R. Hidayat, "Smart Agriculture Monitoring Penyiraman Tanaman Berbasis Internet of Things," *J. PROSISKO*, vol. 9, no. 1, 2022.
- [6] H. Ninik Sri Lestari, Andrew Ghea Mahardika, Sukirno, Herawati, "Internet of Things Implementation for Development of Smart Agriculture Applications Internet of Things Implementation for Development of Smart Agriculture Applications," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2394, pp. 1–5, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2394/1/012035.
- [7] G. Prakash, Deepesh, B. Shrestha, and I. Bajracharya, "A low-cost centralized IoT ecosystem for enhancing oyster mushroom cultivation," *J. Agric. Food Res.*, vol. 15, no. January, p. 100952, 2024, doi: 10.1016/j.jafr.2023.100952.
- [8] D. Purbohadi, N. Diah, and L. Kurniasari, "Social Sciences & Humanities Open From tradition to technology : Semi automated IoT monitoring and its impact on farmers ' practices in Indonesia," *Soc. Sci. Humanit. Open*, vol. 13, no. March, p. 102662, 2026, doi: 10.1016/j.ssaho.2026.102662.
- [9] A. Fariha, Nur, A. Mohd-ariss, and T. N. Tuan-zakaria, "Heliyon Effect of physiochemical parameters on yield and biological efficiency of *Volvariella volvacea* cultivated on empty fruit bunch pellets," *Heliyon*, vol. 11, no. 4, p. e42572, 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42572.
- [10] D. Swain, K. C. Sahu, P. K. Jena, and M. Rout, "Efficacy of Different Cultural Parameters and Physical Factors on Mycelial Growth of Paddy Straw Mushroom (*Volvariella volvacea*)," *Agric. Sci. Dig.*, pp. 1–5, 2025, doi: 10.18805/ag.D-6158.Submitted.
- [11] J. L. Chong, K. W. Chew, A. P. Peter, and H. Y. Ting, "Internet of Things (IoT) -Based Environmental Monitoring and Control System for Home-Based Mushroom Cultivation," *Biosensors*, vol. 13, no. 98, pp. 1–24, 2023.
- [12] A. A. M. Al-talib, C. Kuan, J. Ting, and T. Y. Hui, "IoT Based Smart Mushroom Growing Kit," in *Proceedings of ICAROB*, 2024, pp. 789–794.
- [13] F. Irwanto *et al.*, "Smart Agricultural Technology IoT and fuzzy logic integration for improved substrate environment management in mushroom cultivation," *Smart Agric. Technol.*, vol. 7, no. December 2023, p. 100427, 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100427.
- [14] H. Rahman *et al.*, "IoT enabled mushroom farm automation with Machine Learning to classify toxic mushrooms in Bangladesh," *J. Agric. Food Res.*, vol. 7, p. 100267, 2022, doi: 10.1016/j.jafr.2021.100267.
- [15] J. J. Lee, M. C. Aime, and B. Rajwa, "applied sciences Machine Learning-Based Classification of Mushrooms Using a Smartphone Application," *Appl. Sci. Artic.*, vol. 12, pp. 1–12, 2022.
- [16] S. Duman, A. Elewi, and A. Hajhamed, "A novel dataset of annotated oyster mushroom images with environmental context for machine learning applications," *Data Br.*, vol. 57, p. 111074, 2024, doi: 10.1016/j.dib.2024.111074.
- [17] M. S. Jacob, A. Xu, K. Qian, Z. Qi, X. Li, and B. Zhang, "Artificial Intelligence in Edible Mushroom Cultivation , Breeding , and Classification : A Comprehensive Review," *J. Fungi*, vol. 11, pp. 1–32, 2025.
- [18] K. Yang and D. Argyropoulos, "Smart Agricultural Technology Towards Smart Mushroom Farming: A comprehensive review of data , sensors , robotics and artificial intelligence," *Smart Agric. Technol. J.*, vol. 14, no. March, pp. 1–25, 2026.
- [19] S. Sumarsono, I. Sulistyanningrum, S. Adhistya, E. Permanasari, and B. Pranggono, "Development of a mobile health infrastructure for non - communicable diseases using design science research method : a case study," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 14, no. 9, pp. 12563–12574, 2023, doi: 10.1007/s12652-022-04322-w.
- [20] J. Li, L. Wang, J. I. E. Liu, and C. Science, "ViST : A Ubiquitous Model with Multimodal Fusion for Crop," *ACM Trans. Sens. Networks*, vol. 20, no. 1, 2023.
- [21] J. Chen, Y. Sun, D. Zhang, M. Suzaiddola, Y. A. Nanekharan, and Y. Sun, "Identification of plant disease images via a squeeze-and-excitation MobileNet model.pdf," in *IET Image Processing*, 2020, pp. 1115–1127.