

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Data menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi digital di bidang kesehatan berkembang pesat untuk meningkatkan kualitas pelayanan medis, termasuk perawatan bayi baru lahir. Bayi prematur, yaitu bayi yang lahir sebelum usia kehamilan 37 minggu, merupakan kelompok yang sangat rentan terhadap berbagai komplikasi kesehatan karena organ tubuhnya belum berkembang secara sempurna. Studi terbaru melaporkan bahwa pada tahun 2020 tercatat sekitar 13,4 juta kelahiran prematur di seluruh dunia, dengan angka kejadian bervariasi antara 4% hingga 16% dari total kelahiran di berbagai negara (Ohuma et al., 2023). Di Indonesia, *prematuritas* berkontribusi terhadap sekitar 35% kematian neonatal, dengan Angka Kematian Neonatal (AKN) tercatat sebesar 15 per 1.000 kelahiran hidup, menjadikan permasalahan ini sebagai isu kesehatan neonatal yang mendesak untuk ditangani. Salah satu masalah utamanya adalah sistem *termoregulasi* yang belum matang, sehingga bayi prematur berisiko tinggi mengalami hipotermia, gangguan pernapasan, infeksi, hingga peningkatan mortalitas neonatal apabila tidak dirawat dalam lingkungan yang terkontrol dan stabil (World Health Organization, 2023).

Inkubator bayi merupakan perangkat medis vital yang dirancang untuk menyediakan lingkungan termal stabil menyerupai kondisi *intrauterin*, sehingga bayi dapat mempertahankan suhu tubuh pada rentang optimal 36,5°C–37,5°C. Kegagalan mempertahankan rentang ini dapat mengakibatkan hipotermia neonatal, yang menurut WHO diklasifikasikan menjadi tiga tingkat berdasarkan suhu tubuh bayi: ringan (36–36,5°C), sedang (32–36°C), dan berat (<32°C) (World Health Organization, 1997). Untuk mencegah kondisi tersebut, suhu inkubator yang direkomendasikan disesuaikan dengan berat badan bayi: semakin ringan berat badannya, semakin tinggi suhu inkubator yang dibutuhkan, sesuai tabel *Neutral Thermal Environment* WHO (World Health Organization, 1997).

Namun, inkubator konvensional di banyak fasilitas kesehatan masih mengandalkan kontrol *ON-OFF* atau pengaturan manual yang statis, tidak menyesuaikan *setpoint* secara otomatis terhadap perubahan berat badan bayi, serta minim sistem umpan balik dan *monitoring* otomatis. Pada sistem *termal nonlinier* seperti inkubator, kendali *ON-OFF* cenderung memicu fluktuasi suhu dan stres termal, sementara keterbatasan *monitoring* manual meningkatkan risiko keterlambatan deteksi penyimpangan suhu (Munisankar & Ramashri, 2025). Teknologi *Internet of Things* (IoT) menjadi solusi atas keterbatasan ini karena memungkinkan pemantauan dan kendali jarak jauh secara *real-time* (Munisankar & Ramashri, 2025). Mikrokontroler ESP32 menjadi platform yang banyak dipilih untuk aplikasi IoT semacam ini karena memiliki konektivitas *Wi-Fi* dan Bluetooth terintegrasi, performa komputasi memadai, serta konsumsi daya rendah (Aya-Parra et al., 2023). Pada sisi sensor, pengukuran suhu tubuh secara non-kontak menggunakan sensor inframerah terbukti akurat dan lebih aman dibanding sensor kontak yang berisiko menimbulkan iritasi pada kulit bayi (Zhao & Bergmann, 2023), sementara pengukuran berat badan otomatis menggunakan *load cell* dan modul penguat HX711 telah terbukti presisi untuk aplikasi timbangan bayi, dengan tingkat kesalahan pengukuran serendah 0,01% pada rentang berat 1 kg (Mukhammad et al., 2022).

Untuk kendali suhu, logika fuzzy terbukti lebih adaptif dibanding kendali konvensional dalam menangani ketidakpastian sistem yang *nonlinier*, dan pendekatan yang menggabungkan suhu udara inkubator dan suhu tubuh bayi sebagai pertimbangan kendali terbukti menghasilkan respons yang lebih stabil (Reddy et al., 2009). Namun demikian, penelitian terdahulu umumnya baru mengevaluasi aspek-aspek ini secara terpisah ada yang menerapkan *monitoring* IoT tanpa kendali cerdas, ada pula yang menerapkan kendali fuzzy dengan parameter fungsi keanggotaan yang ditentukan secara *heuristik/manual* tanpa proses optimasi lebih lanjut (Raihan Fadilla et al., n.d.)(Widhiada et al., 2019)(C & Jadhav, 2023).

Untuk mengatasi keterbatasan penentuan basis aturan fuzzy secara *heuristik* tersebut, algoritme optimasi *metaheuristik* seperti *Ant Colony Optimization* (ACO) telah terbukti efektif digunakan untuk menyempurnakan basis aturan (*rule base*) suatu

sistem fuzzy, dengan cara mencari kombinasi konsekuensi aturan yang meminimalkan galat prediksi, sehingga menghasilkan sistem kendali dengan tingkat kesalahan yang lebih rendah dibandingkan basis aturan yang disusun murni berdasarkan pengetahuan awal (*initial knowledge*) (Kozlov, 2021). Pendekatan penggabungan ACO dan sistem inferensi fuzzy ini telah terbukti efektif meningkatkan kualitas basis aturan pada berbagai domain kendali, namun penerapannya secara spesifik untuk optimasi penentuan *setpoint* suhu inkubator bayi berbasis berat badan masih jarang dijumpai dalam literatur.

Dari sisi aktuator, kebutuhan pengaturan suhu idealnya tidak hanya pemanasan tetapi juga pendinginan aktif untuk mengantisipasi *overshoot*. Elemen Peltier (TEC1-12706) dapat berfungsi sebagai pendingin melalui efek Peltier (Single and Dual Zone IR Sensor in TO39 Datasheet General Description Features & Benefits, n.d.), dan prinsip ini telah banyak dimanfaatkan pada sistem pendinginan berbasis IoT dengan pemantauan suhu jarak jauh (Songsree & Thongchaisuratkrul, 2025). Dengan mengombinasikan pemanas PTC berkendali *threshold* bertingkat dan Peltier berkendali PWM proporsional, sistem kendali suhu inkubator diharapkan mampu merespons penyimpangan suhu dari dua arah sekaligus secara lebih adaptif dibanding sistem konvensional yang hanya mengandalkan elemen pemanas tunggal.

Penggabungan seluruh aspek sekaligus:

- a) Penentuan *set point* otomatis berbasis berat badan bayi dan suhu ruang inkubator menggunakan Fuzzy Mamdani yang dioptimasi dengan *Ant Colony Optimization* (ACO), mengacu pada prinsip *Neutral Thermal Environment* WHO (World Health Organization, 1997)(Kozlov, 2021)
- b) Umpan balik lingkaran tertutup (*closed loop feedback*) berbasis sensor suhu udara inkubator (DHT22) yang dipadukan dengan kendali *threshold* bertingkat untuk aktuator pemanas PTC dan kendali proporsional (PWM) untuk aktuator pendingin Peltier, dan
- c) *Monitoring IoT real-time* berbasis sensor non-kontak dan *dashboard web* saat ini masih jarang dievaluasi secara terpadu dalam satu sistem, khususnya pada konteks inkubator bayi. Celah inilah yang menjadi fokus penelitian ini.

Penelitian ini merancang prototipe sistem *monitoring* dan kendali suhu inkubator bayi berbasis IoT dengan tiga tahap kendali. Tahap 1 menentukan *setpoint* suhu secara otomatis dan hanya sekali di awal, dari berat badan bayi (*load cell*) dan suhu ruang inkubator, menggunakan Fuzzy Mamdani yang basis aturannya dioptimasi ACO mengacu pada NTE WHO (World Health Organization, 1997). Karena sistem belum mengakomodasi input usia bayi, penentuan *setpoint* pada tahap ini dibatasi pada rekomendasi suhu untuk hari-hari awal perawatan, sebagaimana dijelaskan lebih lanjut pada batasan penelitian. Tahap 2 menerapkan umpan balik lingkaran tertutup berbasis sensor suhu udara inkubator, menghasilkan nilai *error* yang menjadi dasar Tahap 3, yaitu kendali *threshold* bertingkat untuk PTC dan kendali PWM proporsional untuk Peltier. Sensor suhu tubuh bayi (GY-906/MLX90614) digunakan secara independen sebagai dasar alarm keselamatan bukan sebagai umpan balik kendali suhu utama guna aman dan higienis, sementara seluruh data dipantau *real-time* melalui *dashboard web* berbasis Firebase.

Pengembangan sistem ini sejalan dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs) poin 3 (Kehidupan Sehat dan Sejahtera) melalui dukungan terhadap penurunan angka kematian bayi dan peningkatan kualitas perawatan neonatal, serta poin 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur) melalui pemanfaatan teknologi digital dan inovasi sistem kendali cerdas di bidang kesehatan. Dari perspektif kebijakan nasional, penelitian ini selaras dengan Asta Cita 4 sebagaimana dikutip dalam kajian kebijakan pendidikan nasional, yang menegaskan pentingnya "memperkuat pembangunan SDM, sains, teknologi, pendidikan, kesehatan, prestasi olahraga, kesetaraan gender, serta penguatan peran perempuan, pemuda, dan penyandang disabilitas" sebagai satu kesatuan pilar pembangunan sumber daya manusia unggul (Alhumami, 2025).

1.2 Identifikasi Masalah

Inkubator bayi merupakan sistem kendali termal yang berfungsi menjaga kondisi lingkungan mikro sesuai kebutuhan fisiologis bayi prematur. Idealnya, sistem ini mampu mempertahankan suhu secara stabil, responsif terhadap gangguan, serta

akurat dalam pengukurannya. Namun, berdasarkan kajian literatur dan observasi sistem inkubator konvensional, masih ditemukan beberapa permasalahan sebagai berikut:

1. Ketidakstabilan suhu inkubator akibat sistem kendali sederhana

Sebagian besar inkubator masih menggunakan kendali *ON-OFF* atau manual, yang kurang efektif pada sistem termal bersifat *nonlinier* dan mudah terganggu oleh kondisi lingkungan. Metode ini cenderung menghasilkan fluktuasi suhu yang dapat memicu stres termal pada bayi, karena fungsi *monitoring* dan kendali sering kali belum terintegrasi dalam satu sistem kendali tertutup (*closed-loop*).

2. Keterbatasan sistem *monitoring* suhu secara *real-time* dan jarak jauh

Pemantauan suhu inkubator di sejumlah fasilitas kesehatan masih bergantung pada pengamatan langsung oleh tenaga medis, sehingga berisiko memperlambat deteksi ketika terjadi penyimpangan suhu.

3. Penggunaan sensor kontak yang berpotensi menimbulkan risiko

Sensor suhu berbasis kontak, meski cukup akurat, berpotensi menimbulkan iritasi dan risiko infeksi apabila ditempatkan langsung pada tubuh bayi prematur yang rentan.

4. Basis aturan fuzzy yang disusun secara manual berpotensi belum optimal

Penentuan aturan kendali fuzzy secara konvensional umumnya mengandalkan penalaran pakar, sehingga berisiko menghasilkan aturan yang kurang presisi dan belum tentu meminimalkan galat kendali secara sistematis.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini disusun dalam bentuk pertanyaan penelitian yang bersifat spesifik, terukur, dan operasional, sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem *monitoring* suhu inkubator bayi berbasis *Internet of Things* yang mampu menyajikan data suhu secara *real-time* dan *kontinu*?
2. Bagaimana karakteristik dan akurasi sensor *inframerah* non-kontak (GY-906/MLX90614) dalam mengukur suhu tubuh bayi dibandingkan termometer

digital, serta akurasi sensor DHT22 dalam mengukur suhu ruang inkubator dibandingkan alat ukur pembanding?

3. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan algoritma kendali suhu berbasis fuzzy logic yang mampu menjaga stabilitas suhu inkubator dalam rentang optimal secara adaptif?
4. Sejauh mana optimasi basis aturan Fuzzy Mamdani menggunakan *Ant Colony Optimization* (ACO) mampu meningkatkan akurasi penentuan *setpoint* suhu inkubator dibandingkan basis aturan awal sebelum optimasi?

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan masalah, sebagai berikut:

1. Penelitian ini membatasi pengendalian pada parameter suhu dan kelembapan inkubator, tanpa melibatkan oksigen atau parameter *fisiologis* bayi lainnya. Sensor MLX90614 digunakan khusus untuk memantau suhu tubuh bayi sebagai dasar alarm keselamatan, sedangkan suhu ruang sebagai acuan kendali utama diukur menggunakan sensor DHT22. Berat badan bayi diukur satu kali di awal menggunakan load cell untuk menentukan *setpoint*, bukan sebagai umpan balik berkelanjutan. *Setpoint* suhu ditentukan melalui Fuzzy Logic Mamdani yang basis aturannya dioptimasi dengan *Ant Colony Optimization* (ACO), sementara aktuator pemanas dan pendingin dikendalikan secara non-fuzzy berbasis *threshold* bertingkat dan PWM proporsional, tanpa integrasi metode lain seperti PID atau *neural network*. Komunikasi IoT menggunakan jaringan *Wi-Fi* lokal dengan *dashboard web*, dan pengujian dilakukan pada prototipe skala laboratorium, bukan inkubator medis komersial.
2. Pengujian sistem dilakukan dalam kondisi lingkungan terkontrol dan tidak melibatkan subjek bayi secara langsung. Evaluasi kinerja sistem difokuskan pada analisis kuantitatif, termasuk pengukuran *error* suhu, fluktuasi, dan waktu respons.
3. Penelitian ini tidak membahas aspek regulasi medis atau sertifikasi alat kesehatan, sehingga tidak mencakup persyaratan standar medis untuk implementasi klinis.

4. Objek penelitian berupa miniatur atau manekin bayi, sehingga pengujian dilakukan pada simulasi kondisi suhu, bukan pada bayi sesungguhnya.
5. Dataset menggunakan data simulasi yang disesuaikan dari WHO, bukan data bayi prematur asli.
6. Sistem hanya divalidasi pada rentang kerja fungsi keanggotaan fuzzy yang digunakan, yaitu berat badan 500–3500 gram dan suhu inkubator 30–38°C. Kinerja sistem di luar rentang tersebut tidak dijamin akurat.

1.5 Tujuan Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan tujuan sebagai berikut:

1. Merancang dan membangun sistem *monitoring* suhu inkubator bayi berbasis *Internet of Things (IoT)* yang mengintegrasikan sensor *inframerah* non-kontak sebagai perangkat pengukuran suhu yang aman dan responsif, guna menyajikan data suhu secara *real-time* dan berkelanjutan.
2. Menerapkan metode Fuzzy Mamdani yang dioptimasi menggunakan *Ant Colony Optimization (ACO)* untuk menentukan *setpoint* suhu inkubator secara otomatis berdasarkan berat badan bayi dan suhu ruang, serta menerapkan kendali non-fuzzy berbasis *threshold* dan PWM proporsional pada aktuator pemanas dan pendingin untuk meningkatkan stabilitas dan adaptivitas sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan.
3. Menganalisis dan mengevaluasi kinerja sistem kendali berdasarkan parameter *error* suhu, kestabilan, dan waktu respons (*rise time*, *settling time*, *overshoot*, *steady-state error*), serta mengevaluasi peningkatan akurasi basis aturan Fuzzy Mamdani hasil optimasi ACO dibandingkan basis aturan awal secara kuantitatif.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan sistem kendali cerdas berbasis fuzzy logic pada aplikasi inkubator bayi, serta menambah referensi akademik mengenai integrasi *Internet of Things (IoT)* dan sistem kendali termal dalam bidang otomasi kesehatan.

2. Membantu tenaga medis dalam melakukan *monitoring* suhu inkubator secara *real-time* dan jarak jauh, serta menghasilkan *prototype* sistem inkubator bayi cerdas yang mampu mempertahankan suhu secara stabil dan adaptif terhadap perubahan berat badan bayi.
3. Menjadi dasar pengembangan penelitian lanjutan yang menggabungkan fuzzy logic dengan metode kontrol lain.

