

Implementasi Sistem Inkubator Telur Berbasis IoT Menggunakan Metode Kontrol Bang-Bang Histeresis

Jaguar Deva Nanggalasakti Oktavian¹, Faisal Muttaqin^{2*}, Yisti Vita Via³

^{1,2,3} Informatika, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur
122081010233@student.upnjatim.ac.id

yistivia.if@upnjatim.ac.id

*Corresponding author email: faisalmuttaqin.if@upnjatim.ac.id

Abstrak— Penetasan telur merupakan tahapan kritis dalam budidaya unggas yang membutuhkan kestabilan suhu dan kelembapan secara konsisten. Inkubator sederhana yang masih mengandalkan pengendalian manual rentan terhadap fluktuasi suhu dan keterbatasan pemantauan jarak jauh. Penelitian ini mengimplementasikan sistem inkubator telur berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan metode Kontrol Bang-Bang Histeresis pada mikrokontroler ESP32 untuk mengatasi permasalahan tersebut. Sensor DHT22 digunakan sebagai perangkat pembaca suhu dan kelembapan, sedangkan lampu pijar dan kipas DC dikendalikan melalui modul relay sebagai aktuator. Mekanisme histeresis diterapkan di sekitar setpoint suhu 37,5°C dan kelembapan 55% RH guna meredam frekuensi switching aktuator yang berlebihan (*chattering*). Integrasi platform Blynk IoT memungkinkan pemantauan kondisi inkubator secara real-time dari jarak jauh. Pengujian dilakukan selama 60 menit dengan 121 data pengamatan dan membandingkan kinerja metode Bang-Bang konvensional dengan Bang-Bang Histeresis. Hasil menunjukkan bahwa metode Bang-Bang Histeresis mampu menurunkan nilai MAE suhu dari 0,2219°C menjadi 0,1126°C, RMSE dari 0,2642°C menjadi 0,1319°C, serta standar deviasi dari 0,2658°C menjadi 0,1321°C. Pada kelembapan, penurunan serupa terjadi pada seluruh parameter evaluasi. Penerapan histeresis terbukti efektif dalam meningkatkan kestabilan suhu inkubasi dan mengurangi osilasi di sekitar setpoint dibandingkan metode Bang-Bang konvensional.

Kata Kunci— Inkubator Telur, Bang-Bang Histeresis, Internet of Things, ESP32, Blynk IoT.

I. PENDAHULUAN

Peternakan unggas merupakan salah satu sektor usaha yang memiliki peranan penting dalam mendukung ketahanan pangan nasional [1]. Dalam proses budidayanya, salah satu tahapan yang paling menentukan keberhasilan adalah penetasan telur, yaitu sebuah proses yang sangat sensitif terhadap kondisi lingkungan, terutama suhu dan kelembapan yang harus dijaga agar tetap stabil [2]. Secara alami, proses penetasan dilakukan oleh induk unggas melalui pengeraman hingga telur menetas. Namun, metode alami ini memiliki keterbatasan dalam jumlah telur yang dapat dierami serta sangat bergantung pada kondisi induk [3]. Oleh karena itu, penggunaan mesin inkubator telur menjadi alternatif yang banyak digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan kapasitas produksi penetasan telur.

Mesin inkubator telur dirancang untuk meniru kondisi pengeraman alami dengan cara mempertahankan suhu dan kelembapan di dalam ruang inkubasi secara konsisten [4]. Pada proses penetasan telur ayam, suhu optimal yang dibutuhkan umumnya berada pada kisaran 37 hingga 38°C, di mana ketidakstabilan suhu sekecil apapun dapat mengganggu perkembangan embrio dan berujung pada menurunnya tingkat keberhasilan penetasan [5]. Namun pada kenyataannya, sebagian besar inkubator sederhana yang beredar saat ini masih bergantung pada sistem pengendalian suhu secara manual yang rentan terhadap ketidakstabilan, sehingga fluktuasi suhu sulit untuk dihindari [6]. Selain itu, keterbatasan sistem pemantauan yang mengharuskan peternak hadir secara langsung di lokasi membuat proses pengawasan menjadi kurang praktis dan tidak memberikan kemudahan dalam memperoleh informasi kondisi inkubator secara langsung maupun dari jarak jauh.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan berbagai perangkat untuk saling terhubung melalui jaringan internet, sehingga kondisi suatu sistem dapat dipantau secara langsung dari jarak jauh [7]. Dalam pengendalian suhu, salah satu metode yang paling sederhana adalah Kontrol Bang-Bang, yang bekerja dengan mengaktifkan aktuator saat suhu berada di bawah *setpoint* dan mematikannya saat suhu telah tercapai [8]. Meskipun mudah diterapkan, metode ini memiliki kelemahan berupa peralihan aktuator yang terlalu sering saat suhu berada di sekitar *setpoint*, kondisi yang dikenal sebagai *chattering*, yang dapat menyebabkan fluktuasi suhu dan mempercepat kerusakan komponen aktuator.

Untuk mengatasi permasalahan *chattering* pada metode Kontrol Bang-Bang, penelitian ini menerapkan Kontrol Bang-Bang histeresis pada sistem inkubator telur berbasis IoT. Penerapan rentang histeresis sebagai batas atas dan batas bawah di sekitar setpoint suhu bertujuan untuk mengurangi frekuensi switching aktuator sehingga fluktuasi suhu dapat diminimalkan dan kestabilan suhu inkubasi dapat lebih terjaga. Selain itu, integrasi teknologi IoT memungkinkan pemantauan kondisi inkubator secara real-time dan jarak jauh. Dengan pendekatan tersebut, sistem diharapkan mampu meningkatkan efisiensi kerja aktuator serta mendukung proses penetasan telur yang lebih optimal. KAJIAN TEORITIS

A. Inkubator Telur

Inkubator telur adalah suatu alat yang digunakan untuk menetas telur dengan cara menciptakan kondisi lingkungan yang menyerupai pengeraman alami oleh induk [9]. Alat ini bekerja dengan mengontrol suhu, kelembapan, dan sirkulasi udara agar tetap berada pada kondisi optimal sehingga embrio di dalam telur dapat berkembang dengan baik hingga menetas [10]. Inkubator telur banyak digunakan dalam bidang peternakan unggas untuk meningkatkan efisiensi penetasan, memungkinkan penetasan dalam jumlah besar, serta mengurangi ketergantungan pada induk ayam atau unggas lainnya.

B. Hysteresis Logic

Hysteresis logic merupakan pendekatan pengendalian yang memanfaatkan dua ambang batas, yaitu batas bawah dan batas atas, sebagai acuan pengambilan keputusan dalam sistem kontrol. Aktuator akan diaktifkan apabila nilai variabel yang dikendalikan turun di bawah ambang batas bawah, dan akan dinonaktifkan ketika nilai tersebut telah mencapai atau melampaui ambang batas atas. Mekanisme ini dirancang untuk meredam laju pergantian kondisi *ON-OFF* yang berlebihan sebagaimana yang kerap terjadi pada sistem Kontrol Bang-Bang, sehingga kestabilan sistem dapat terjaga sekaligus memperpanjang umur pakai komponen aktuator [11]. Dalam konteks sistem inkubator telur, penerapan hysteresis logic berperan penting dalam mempertahankan suhu pada rentang yang telah ditetapkan, meminimalkan fluktuasi termal, serta menciptakan kondisi penetasan yang lebih optimal dan konsisten.

C. Kontrol Bang-Bang

Kontrol Bang-Bang merupakan metode pengendalian sederhana yang bekerja dengan dua kondisi utama, yaitu *ON* dan *OFF*. Pada metode ini, aktuator akan menyala (*ON*) ketika nilai variabel yang dikontrol berada di bawah nilai setpoint yang telah ditentukan dan akan mati (*OFF*) ketika nilai tersebut telah mencapai atau melebihi setpoint. Sistem kontrol ini banyak digunakan pada pengendalian suhu karena memiliki struktur yang sederhana, mudah diimplementasikan, serta tidak memerlukan perhitungan yang kompleks [12]. Dalam penerapannya pada inkubator telur, Kontrol Bang-Bang berfungsi untuk menjaga suhu ruang inkubator tetap mendekati suhu yang dibutuhkan untuk proses penetasan telur. Ketika suhu di dalam inkubator berada di bawah setpoint, pemanas akan diaktifkan untuk meningkatkan suhu, sedangkan ketika suhu telah mencapai atau melebihi setpoint, pemanas akan dimatikan sehingga suhu dapat turun kembali secara alami. Dengan mekanisme tersebut, kondisi lingkungan di dalam inkubator dapat dipertahankan agar tetap sesuai dengan kebutuhan perkembangan embrio hingga proses penetasan berlangsung dengan baik.

D. Internet of Things

Internet of Things (IoT) merupakan konsep teknologi yang menghubungkan berbagai perangkat fisik ke jaringan internet sehingga perangkat tersebut dapat saling bertukar data dan berkomunikasi secara otomatis. Perangkat IoT biasanya dilengkapi dengan sensor, aktuator, dan modul komunikasi yang memungkinkan pengambilan serta pengiriman data secara *real-time* [13]. Dalam penerapannya pada inkubator telur, teknologi IoT berfungsi untuk memantau kondisi lingkungan inkubator seperti suhu dan kelembapan secara jarak jauh melalui jaringan internet. Data dari sensor akan dikirim ke platform atau aplikasi sehingga pengguna dapat memonitor kondisi inkubator secara *real-time* dan mengetahui apabila terjadi perubahan kondisi yang tidak sesuai dengan kebutuhan proses penetasan telur.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen terapan yang berfokus pada perancangan dan pengujian sistem pengendalian suhu pada inkubator telur berbasis *Internet of Things* (IoT). Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan sekaligus mengevaluasi kinerja metode Kontrol Bang-Bang yang dikombinasikan dengan mekanisme hysteresis dalam menjaga kestabilan suhu ruang inkubasi secara otomatis. Tahapan penelitian dimulai dari studi pendahuluan dan kajian literatur, kemudian dilanjutkan dengan proses perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, integrasi sensor suhu dengan aktuatur pemanas serta modul IoT, pelaksanaan pengujian sistem, dan analisis hasil pengujian untuk menilai tingkat kestabilan suhu serta efektivitas metode kontrol yang diterapkan pada sistem inkubator telur yang dikembangkan.

A. Studi Literatur

Tahap awal penelitian ini diawali dengan pelaksanaan studi literatur yang bertujuan untuk mengumpulkan dan mengkaji berbagai referensi ilmiah yang relevan sebagai landasan teoritis dan konseptual penelitian. Melalui proses kajian tersebut, peneliti memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif dan sistematis mengenai prinsip kerja metode yang diterapkan, teknologi pendukung yang digunakan, serta hasil-hasil yang telah dicapai oleh penelitian sebelumnya. Dengan demikian, studi literatur menjadi fondasi yang esensial dalam memastikan bahwa proses perancangan dan pelaksanaan penelitian dapat dilakukan secara terarah, logis, dan selaras dengan kaidah ilmiah yang berlaku.

B. Analisis Kebutuhan

Tahap analisis kebutuhan dilakukan untuk mengidentifikasi dan merumuskan spesifikasi sistem yang akan dikembangkan agar sesuai dengan tujuan penelitian. Pada tahap ini ditentukan kebutuhan fungsional dan nonfungsional sistem yang mencakup kemampuan sistem dalam memantau serta mengendalikan suhu inkubator secara otomatis menggunakan metode Kontrol Bang-Bang yang dikombinasikan dengan mekanisme hysteresis. Analisis juga meliputi penentuan

kebutuhan perangkat keras, seperti sensor suhu untuk mendeteksi kondisi ruang inkubasi, aktuator pemanas sebagai pengatur suhu, mikrokontroler sebagai unit pemroses utama, serta modul komunikasi untuk mendukung integrasi berbasis *Internet of Things* (IoT). Secara fungsional, sistem dirancang agar mampu memantau suhu inkubator secara real-time, mengendalikan pemanas secara otomatis berdasarkan nilai setpoint yang ditentukan, serta menyediakan fitur monitoring jarak jauh melalui jaringan internet. Rincian kebutuhan fungsional sistem disajikan pada Tabel I.

TABEL I
KEBUTUHAN FUNGSIONAL

No	Kebutuhan Fungsional	Deskripsi
1.	Monitoring suhu	Sistem mampu membaca dan menampilkan data suhu secara real-time.
2.	Monitoring kelembapan	Sistem mampu membaca dan menampilkan data kelembapan secara real-time.
3.	Pengendalian pemanas	Sistem dapat mengontrol aktuator pemanas menggunakan metode Bang-Bang Histeresis.
4.	Pengendalian pelembam	Sistem dapat mengaktifkan atau menonaktifkan pelembam berdasarkan nilai setpoint dan histeresis.
5.	Integrasi IoT	Sistem dapat mengirim dan/atau menampilkan data monitoring melalui platform berbasis IoT.

Kebutuhan nonfungsional berkaitan dengan karakteristik kualitas sistem yang mendukung kinerja operasionalnya. Aspek ini mencakup kestabilan suhu inkubator yang harus dipertahankan pada rentang tertentu, akurasi pembacaan sensor suhu, kecepatan respons sistem dalam mengaktifkan atau menonaktifkan pemanas berdasarkan metode Kontrol Bang-Bang histeresis, efisiensi penggunaan energi, serta keandalan sistem dalam beroperasi secara kontinu selama proses inkubasi berlangsung. Rincian kebutuhan nonfungsional sistem disajikan pada Tabel II.

TABEL II
KEBUTUHAN NONFUNGSIONAL

No	Kebutuhan Nonfungsional	Deskripsi
1.	Kestabilan sistem	Sistem harus mampu menjaga suhu dan kelembapan tetap stabil sesuai setpoint.
2.	Akurasi pembacaan	Sensor yang digunakan harus memiliki tingkat akurasi yang memadai.

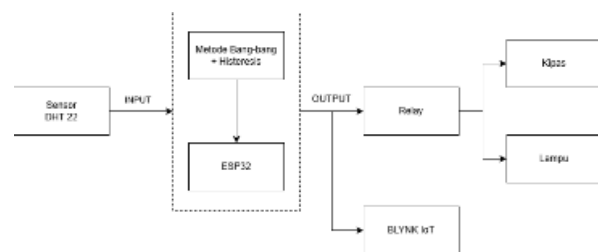
No	Kebutuhan Nonfungsional	Deskripsi
3.	Responsif	Sistem harus memiliki waktu respons yang cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan.
4.	Efisiensi energi	Pengendalian aktuator harus bekerja secara efisien untuk meminimalkan konsumsi daya.
5.	Keandalan operasional	Sistem harus dapat bekerja secara kontinu tanpa gangguan dalam periode inkubasi.

Kebutuhan perangkat keras mencakup komponen fisik yang digunakan dalam pembangunan sistem inkubator telur berbasis IoT, meliputi sensor suhu sebagai input, aktuator pemanas sebagai output, mikrokontroler sebagai pusat pengendali, serta modul komunikasi untuk konektivitas IoT. Komponen utama yang digunakan antara lain ESP32, sensor DHT22, modul relay, LCD 16x2 berbasis I2C, kipas DC, dan motor DC. Lampu pijar digunakan sebagai elemen pemanas dengan sumber daya dari power supply 12V 3A, sementara modul step-down digunakan untuk menyesuaikan tegangan bagi ESP32 dan komponen lainnya. Seluruh rangkaian diuji terlebih dahulu menggunakan breadboard sebelum dipasang secara permanen untuk membentuk prototipe sistem inkubator.

C. Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem dilakukan berdasarkan hasil analisis kebutuhan yang telah ditentukan sebelumnya. Pada tahap ini disusun rancangan arsitektur sistem yang mencakup integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak agar sistem inkubator dapat bekerja secara optimal. Perancangan meliputi pembuatan diagram blok sistem, perancangan rangkaian elektronik, serta penyusunan algoritma kontrol menggunakan metode Bang-Bang yang dikombinasikan dengan mekanisme histeresis.

1) Diagram Blok

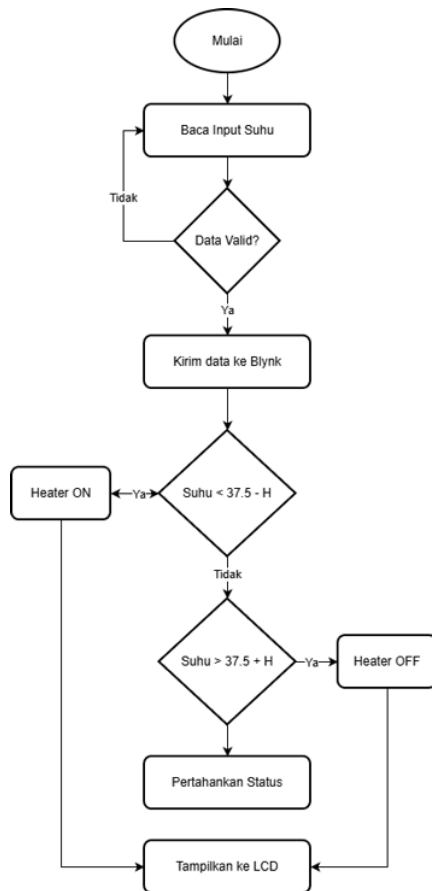


Gbr. 1 Diagram Blok

Berdasarkan Gbr. 1, sistem inkubator telur berbasis IoT bekerja dengan memanfaatkan sensor DHT22 sebagai perangkat input untuk membaca suhu di dalam ruang inkubator. Data suhu tersebut dikirimkan ke ESP32 sebagai mikrokontroler yang

memprosesnya menggunakan metode Kontrol Bang-Bang dengan mekanisme histeresis. Hasil pemrosesan kemudian mengendalikan modul relay yang berfungsi mengaktifkan atau menonaktifkan lampu pijar sebagai elemen pemanas dan kipas sebagai sirkulasi udara. Selain itu, ESP32 juga terhubung dengan platform Blynk IoT sehingga data suhu dapat dipantau secara real-time melalui jaringan internet.

2) Flowchart Kontrol Bang-Bang



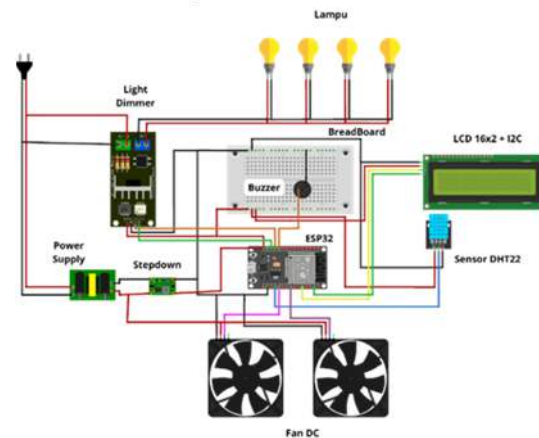
Gbr. 2 Flowchart Kontrol Bang-Bang Histeresis

Flowchart Kontrol Bang-Bang histeresis dimulai dengan pembacaan data suhu dari sensor DHT22, kemudian dilakukan validasi data untuk memastikan hasil pembacaan sensor dapat digunakan. Jika data valid, nilai suhu dikirim ke platform Blynk untuk monitoring secara real-time, selanjutnya sistem membandingkan suhu terhadap batas histeresis di sekitar setpoint 37,5°C. Pemanas akan diaktifkan ketika suhu berada di bawah batas bawah (37,5 – H) dan dinonaktifkan ketika suhu melebihi batas atas (37,5 + H). Apabila suhu berada di antara kedua batas tersebut, status pemanas dipertahankan pada kondisi sebelumnya untuk mengurangi frekuensi switching aktuator. Setelah proses pengendalian selesai, nilai suhu dan status sistem ditampilkan pada LCD, kemudian siklus

pengendalian diulangi secara terus-menerus selama inkubator beroperasi.

3) Rangkaian Listrik

Rangkaian listrik dirancang dengan menempatkan sensor DHT22 sebagai masukan sistem untuk memperoleh data suhu dan kelembapan dari ruang inkubasi. Sensor terhubung ke ESP32 melalui pin GPIO 4 sebagai pengendali utama yang memproses data menggunakan algoritma Kontrol Bang-Bang histeresis. Keluaran sistem berupa lampu pijar dan kipas DC dihubungkan ke ESP32 melalui modul relay sehingga aktuator dapat dikendalikan secara aman. Sumber daya menggunakan power supply 12V 3A, sedangkan tegangan kerja ESP32 dan komponen bertegangan rendah disesuaikan menggunakan modul step-down. Rancangan ini memungkinkan proses akuisisi data, pengendalian aktuator, dan komunikasi IoT berjalan secara terintegrasi dalam satu sistem inkubator telur.



Gbr. 3 Rangkaian Kelistrikan

D. Implementasi

Tahap implementasi dilakukan dengan merealisasikan rancangan sistem melalui integrasi sensor DHT22, ESP32, modul relay, lampu pemanas, dan kipas ke dalam satu sistem inkubator. Pada tahap ini juga dilakukan pemrograman algoritma Kontrol Bang-Bang Histeresis pada ESP32 serta integrasi dengan platform IoT untuk pengiriman data monitoring secara real-time. Implementasi bertujuan memastikan seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak berfungsi sesuai dengan rancangan sistem yang telah dibuat.

E. Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem inkubator telur berbasis IoT dalam menjaga kestabilan suhu menggunakan metode kontrol Bang-Bang histeresis. Pengujian berlangsung selama 1 jam dengan interval pencatatan data setiap 30 detik sehingga diperoleh 121 data pengamatan. Data suhu yang diperoleh kemudian dianalisis dan dibandingkan dengan hasil pengujian menggunakan metode Kontrol Bang-

Bang konvensional. Perbandingan dilakukan berdasarkan kemampuan sistem dalam mempertahankan suhu di sekitar setpoint, tingkat fluktuasi suhu yang terjadi, serta frekuensi perpindahan kondisi aktuator (ON/OFF). Hasil pengujian selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mengetahui efektivitas penerapan histeresis dalam meningkatkan kestabilan suhu pada sistem inkubator telur.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menampilkan hasil implementasi dan pengujian prototipe sistem inkubator telur berbasis IoT yang dirancang sebagai solusi otomatis untuk mendukung proses penetasan telur unggas. Fokus penelitian berada pada pengembangan sistem pemantauan dan pengendalian suhu serta kelembapan secara otomatis menggunakan metode Kontrol Bang-Bang yang dikombinasikan dengan logika histeresis, agar kondisi ruang inkubasi tetap stabil sesuai setpoint suhu 37,5°C dan kelembapan 55% RH yang telah ditetapkan.

A. Implementasi Hardware

Implementasi hardware menghasilkan sebuah prototipe inkubator telur berbasis IoT yang terdiri atas mikrokontroler ESP32, sensor suhu dan kelembapan, modul relay, lampu pijar sebagai pemanas, kipas DC sebagai sirkulator udara, motor pemutar rak telur, serta catu daya switching. ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali yang memproses data sensor dan mengendalikan aktuator berdasarkan algoritma Kontrol Bang-Bang Histeresis, sekaligus mengirimkan data pemantauan melalui jaringan internet. Seluruh komponen diintegrasikan dalam ruang inkubasi berbahan kayu dan styrofoam untuk meminimalkan kehilangan panas serta mendukung kestabilan kondisi inkubasi. Hasil implementasi perangkat keras yang telah direalisasikan ditunjukkan pada Gambar 4, yang memperlihatkan konstruksi inkubator beserta penempatan komponen elektronik dan aktuator yang digunakan dalam penelitian ini.



Gbr. 4 Prototipe Inkubator Telur

B. Implementasi Internet of Things

Implementasi *Internet of Things* (IoT) pada penelitian ini menggunakan Blynk IoT sebagai media monitoring kondisi inkubator secara real-time. Mikrokontroler ESP32

mengirimkan data suhu, kelembapan, status lampu pemanas, status kipas, serta kondisi ruang inkubasi melalui koneksi internet ke server Blynk menggunakan fungsi *Blynk.virtualWrite()*. Data yang diterima kemudian ditampilkan pada dashboard dalam bentuk gauge, indikator status, dan grafik historis sehingga pengguna dapat memantau kondisi inkubator dari jarak jauh melalui perangkat yang terhubung ke internet. Hasil implementasi dashboard monitoring ditunjukkan pada Gambar 4, yang memperlihatkan nilai suhu sebesar 38°C, kelembapan 43%, status lampu OFF, status kipas ON, serta grafik perubahan suhu dan kelembapan selama proses pengujian.



Gbr. 5 Dashboard pemantauan Blynk IoT

TABEL III
KONFIGURASI VIRTUAL PIN BLYNK

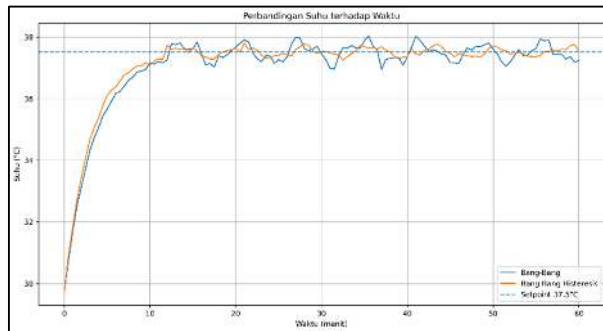
No	Virtual Pin	Parameter	Keterangan
1	V0	Suhu	Menampilkan nilai suhu inkubator (°C)
2	V1	Kelembapan	Menampilkan nilai kelembapan inkubator (%)
3	V2	Heater State	Indikator status relay pemanas (ON/OFF)
4	V3	Fan State	Indikator status kipas (ON/OFF)
5	V4	Heater Status	Menampilkan kondisi pemanas dalam bentuk teks
6	V5	Fan Status	Menampilkan kondisi kipas dalam bentuk teks
7	V6	Kondisi	Menampilkan kondisi ruang inkubasi berdasarkan hasil kontrol sistem

Tabel III menunjukkan pemetaan virtual pin yang digunakan untuk komunikasi data antara ESP32 dan platform Blynk, sehingga seluruh parameter operasional inkubator dapat dipantau secara real-time melalui dashboard monitoring.

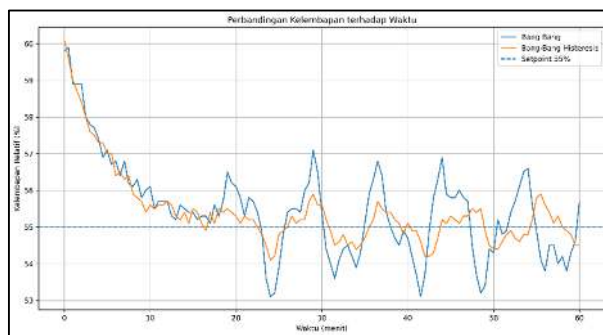
C. Pengujian Sistem Kontrol

Pengujian sistem kontrol dilakukan untuk membandingkan kinerja metode Kontrol Bang-Bang dan Bang-Bang Histeresis dalam menjaga kestabilan suhu dan kelembapan inkubator. Pengambilan data dilakukan selama 60 menit dengan interval

sampling 30 detik, sehingga diperoleh 121 data pengamatan untuk setiap metode. Setpoint suhu ditetapkan sebesar 37,5°C dan setpoint kelembapan sebesar 55% RH. Data suhu dan kelembapan yang diperoleh dari sensor DHT22 direkam secara berkala, kemudian dianalisis menggunakan parameter Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), overshoot, undershoot, dan standar deviasi untuk mengevaluasi tingkat akurasi dan kestabilan sistem.



Gbr. 6 Perbandingan Respon Suhu



Gbr. 7 Perbandingan Respon Kelembapan

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 6 dan 7, metode Bang-Bang Histeresis menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan Bang-Bang konvensional dalam menjaga kestabilan suhu dan kelembapan inkubator. Pada pengendalian suhu, nilai MAE, RMSE, overshoot, undershoot, dan standar deviasi berhasil diturunkan dari masing-masing 0,2219°C, 0,2642°C, 0,53°C, 0,56°C, dan 0,2658°C menjadi 0,1126°C, 0,1319°C, 0,29°C, 0,25°C, dan 0,1321°C. Hasil serupa juga diperoleh pada pengendalian kelembapan, di mana MAE menurun dari 0,8469% menjadi 0,3481%, RMSE dari 0,9892% menjadi 0,4205%, overshoot dari 2,10% menjadi 0,90%, undershoot dari 1,90% menjadi 0,90%, serta standar deviasi dari 0,9953% menjadi 0,4230%. Penurunan seluruh parameter tersebut menunjukkan bahwa penerapan histeresis mampu mengurangi fluktuasi di sekitar setpoint dan frekuensi switching aktuator, sehingga menghasilkan respons sistem yang lebih stabil dibandingkan metode Bang-Bang konvensional.

TABEL IV
PERBANDINGAN PENGUJIAN SUHU

Parameter	Bang-Bang	Bang-Bang Histeresis
MAE (°C)	0,2219	0,1126
RMSE (°C)	0,2642	0,1319
Overshoot (°C)	0,53	0,29
Undershoot (°C)	0,56	0,25
Standar Deviasi (°C)	0,2658	0,1321

TABEL V
PERBANDINGAN PENGUJIAN KELEMBAPAN

Parameter	Bang-Bang	Bang-Bang Histeresis
MAE (%)	0,8469	0,3481
RMSE (%)	0,9892	0,4205
Overshoot (%)	2,10	0,90
Undershoot (%)	1,90	0,90
Standar Deviasi (%)	0,9953	0,4230

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan sistem inkubator telur berbasis IoT menggunakan metode Kontrol Bang-Bang histeresis pada ESP32 untuk menjaga kestabilan suhu inkubasi dengan setpoint 37,5°C serta menyediakan monitoring real-time melalui Blynk. Berdasarkan hasil pengujian selama 60 menit dengan 121 data pengamatan, metode Bang-Bang histeresis menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan Bang-Bang konvensional, ditunjukkan oleh penurunan nilai MAE suhu dari 0,2219°C menjadi 0,1126°C, RMSE dari 0,2642°C menjadi 0,1319°C, serta standar deviasi dari 0,2658°C menjadi 0,1321°C. Pada kelembapan, nilai MAE, RMSE, dan standar deviasi juga menurun dari 0,8469%, 0,9892%, dan 0,9953% menjadi 0,3481%, 0,4205%, dan 0,4230%. Selain itu, nilai overshoot dan undershoot pada suhu maupun kelembapan berhasil ditekan secara signifikan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan histeresis efektif dalam mengurangi osilasi di sekitar setpoint dan frekuensi switching aktuator, sehingga menghasilkan kondisi inkubasi yang lebih stabil dibandingkan metode Bang-Bang konvensional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Informatika, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, yang telah memberikan dukungan fasilitas dan sumber daya selama proses penelitian berlangsung. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah memberikan masukan, saran, dan dukungan dalam penyelesaian penelitian ini, serta kepada Tim SANTIKA atas penyelenggaraan Seminar Nasional Informatika Bela Negara sebagai wadah publikasi ilmiah.

REFERENSI

- [1] Irma, I. Purnama, F. Juanda, and D. M. Raisa, "Peran Usaha Ternak

dalam mendukung Ketahanan Pangan dan Ekonomi Keluarga : Kajian Studi Literatur,” *J. Ilm. Peternak. Halu Oleo*, vol. 7, no. 4, pp. 511–517, 2025, doi: 10.56625/jipho.v7i4.406.

[2] L. Zebua, “Pengaruh Variasi Suhu Penetasan Terhadap Fertilitas, Daya Hidup Embrio dan Daya Tetas Telur Ayam Mirah,” Universitas HKBP Nommensen, 2023.

[3] B. Fitroh, D. Rois, N. Oktyajati, M. Malik, and B. Adhi, “Pelatihan Mesin Tetas Otomatis kepada Siswa dalam Menerapkan Kurikulum Peternakan dan Kewirausahaan di MI Hidayatul Insan Karanganyar Jawa Tengah,” *J. Pengabd. Masy. Inov. Indones.*, vol. 2, no. 5, pp. 561–570, 2024, doi: 10.54082/jpmii.586.

[4] J. Nugraha and D. Irawan, “Rancang Bangun Inkubator Telur Unggas Bertenaga Hybrid Menggunakan Perhitungan Otomatis,” *J. Media Teknol.*, vol. 12, no. 1, pp. 137–143, 2025, doi: 10.25157/jmt.v12i1.5356.

[5] J. Wati, M. Yantidewi, and U. Deta, “Pengaruh Jumlah Lampu Pijar terhadap Suhu Mesin Penetas Telur Berbasis Raspberry Pi,” *J. Kolaboratif Sains*, vol. 6, no. 7, pp. 575–585, 2023, doi: 10.56338/jks.v6i7.3784.

[6] D. Herawan, I. Yasa, I. Swamardika, L. Jasa, and I. Wijaya, “Rancang Bangun Prototype Monitoring System Berbasis Internet of Things Pada Inkubator Penetasan Telur Ayam,” *J. SPEKTRUM*, vol. 12, no. 3, pp. 161–169, 2025, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2025.v12.i03.p16.

[7] S. Megawati and A. Lawi, “Pengembangan Sistem Teknologi Internet of Things Yang Perlu Dikembangkan Negara Indonesia,” *J. Inf. Eng. Educ. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 19–26, 2021, doi: 10.26740/jieet.v5n1.p19-26.

[8] D. Wijaya, B. Rahmat, and E. Puspaningrum, “Sistem Kontrol PH Up-Down Berbasis Nodemcu32 Dengan Metode On-Off Controller,” *J. Inform. dan Sist. Inf.*, vol. 03, no. 2, pp. 96–104, 2022, [Online]. Available: <http://jifosi.upnjatim.ac.id/index.php/jifosi/article/view/476/232>

[9] D. I. M. Nugraha, and I. Prabadika, “Pengembangan Inkubator Telur Ayam Kampung Bali Otomatis Berbasis Internet of Things (IoT),” vol. 10, no. 1, pp. 640–647, 2025.

[10] M. Iqbal and O. Candra, “Rancang Bangun Alat Incubator Telur Otomatis Berbasis Internet Of Things (IOT) Menggunakan Wemos D1 R1,” *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 4, no. 2, pp. 665–674, 2023, doi: 10.24036/jtein.v4i2.434.

[11] M. T. Thobroni, H. K. Safitri, and F. Fitri, “Sistem Kontrol Suhu dan Kelembapan Dengan Metode Hysteris Untuk Proses Pembuatan Pupuk Kompos,” *Mutiara Multidiciplinary Sci.*, vol. 2, no. 5, pp. 270–281, 2024, doi: 10.57185/mutiara.v2i5.183.

[12] A. Setiawan, E. Prasetyo, and B. Nugroho, “Implementasi Metode Bang-Bang Control pada Sistem Pengatur Suhu Berbasis Arduino,” *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 9, no. 3, pp. 189–195, 2020.

[13] M. Soori, B. Arezoo, and R. Dastres, “Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review,” *Internet Things Cyber-Physical Syst.*, vol. 3, no. April, pp. 192–204, 2023, doi: 10.1016/j.iotcps.2023.04.006.