

RANCANG BANGUN SISTEM MONITORING DAN PENGENDALIAN SUHU PADA INKUBATOR MINI BERBASIS ESP32 MENGGUNAKAN METODE BANG-BANG CONTROL DENGAN PLATFORM BLYNK IoT

Khairunnisa Addin; Fajar Suryawan. S.T., M.Eng.Sc.,Ph.D
Teknik Elektro; Teknik; Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Inkubator mini merupakan perangkat yang digunakan untuk menciptakan kondisi lingkungan yang mendukung proses penetasan telur. Kestabilan suhu menjadi salah satu faktor penting dalam proses inkubasi sehingga diperlukan sistem pengendalian suhu secara otomatis. Penelitian ini bertujuan merancang sistem monitoring dan pengendalian suhu pada inkubator mini berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan ESP32 dan platform Blynk IoT. Sistem menggunakan sensor SHT31 untuk mengukur suhu, heater PTC 12 V 120 W sebagai pemanas, kipas DC 12 V sebagai pendingin, dan LCD I2C 16×2 sebagai tampilan lokal. Pengendalian suhu menggunakan metode Bang-Bang Control dengan histeresis untuk mengurangi frekuensi hidup-mati aktuator. Data suhu dikirimkan ke Blynk IoT sehingga dapat dipantau secara real-time melalui perangkat bergerak. Pengujian dilakukan selama 60 menit dengan set point 37,5°C. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu menjaga suhu pada kisaran 37,1°C hingga 37,9°C serta menampilkan suhu dan status aktuator secara real-time. Sistem yang dikembangkan dapat berfungsi sesuai rancangan untuk monitoring dan pengendalian suhu inkubator mini.

Kata Kunci: Bang-Bang Control, ESP32, Blynk IoT, Pengendalian Suhu, SHT31.

Abstract

A mini incubator is a device used to create environmental conditions that support the egg hatching process. Temperature stability is an important factor in the incubation process, so an automatic temperature control system is needed. This study aims to design a temperature monitoring and control system for an Internet of Things (IoT)-based mini incubator using ESP32 and the Blynk IoT platform. The system uses an SHT31 sensor to measure temperature, a 12V 120W PTC heater as a heater, a 12V DC fan as a cooler, and a 16x2 I2C LCD as a local display. Temperature control uses the Bang-Bang Control method with hysteresis to reduce the frequency of actuator on-off. Temperature data is sent to Blynk IoT so it can be monitored in real-time via mobile devices. Testing was carried out for 60 minutes with a set point of 37.5°C. The test results showed that the system was able to maintain the temperature in the range of 37.1°C to 37.9°C and display the temperature and actuator status in real-time. The developed system can function as designed for monitoring and controlling the temperature of a mini incubator.

Keywords: Bang-Bang Control, ESP32, Blynk IoT, Temperature Control, SHT31.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) telah mendorong terciptanya berbagai sistem yang mampu melakukan pemantauan dan pengendalian perangkat secara jarak jauh melalui jaringan internet. Pemanfaatan teknologi tersebut memungkinkan proses pertukaran data berlangsung secara *real-time* sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi sistem dengan cepat sekaligus mengambil tindakan apabila terjadi perubahan parameter. Saat ini, IoT telah diterapkan pada berbagai sektor, di

antaranya industri, pertanian, peternakan, kesehatan, hingga sistem otomasi.

Salah satu penerapan IoT yang berpotensi memberikan manfaat adalah pada sistem inkubator mini untuk penetasan telur. Inkubator berfungsi menyediakan lingkungan buatan yang menyerupai kondisi alami induk ayam, terutama dalam menjaga suhu selama proses inkubasi. Ketidakstabilan suhu dapat menurunkan tingkat keberhasilan penetasan. Pada inkubator sederhana, pengaturan suhu umumnya masih dilakukan secara manual sehingga memerlukan pengawasan berkala dan kurang efisien ketika digunakan dalam waktu yang lama.

ESP32 merupakan mikrokontroler yang banyak digunakan pada pengembangan sistem IoT karena telah dilengkapi modul Wi-Fi, memiliki kemampuan pemrosesan yang baik, serta mendukung berbagai antarmuka komunikasi dengan perangkat eksternal (Espressif Systems, 2023). Integrasi ESP32 dengan platform Blynk IoT memungkinkan data hasil pengukuran ditampilkan secara *real-time* melalui aplikasi pada *smartphone* maupun *dashboard* berbasis web sehingga proses monitoring dapat dilakukan dari berbagai lokasi yang memiliki akses internet (Blynk Inc., 2024).

Bang-Bang Control merupakan metode pengendalian sederhana yang bekerja dengan dua kondisi keluaran, yaitu ON dan OFF. Aktuator akan diaktifkan ketika nilai variabel proses berada di bawah batas yang telah ditentukan dan dinonaktifkan ketika mencapai batas atas. Metode ini banyak digunakan pada sistem pengendalian suhu karena mudah diimplementasikan serta memiliki respons yang cepat. Untuk mengurangi perubahan kondisi aktuator secara berulang (*chattering*), metode Bang-Bang Control dipadukan dengan histeresis sehingga aktuator tidak sering berpindah kondisi ketika suhu berada di sekitar *set point* (Ogata, 2010; Hidayat et al., 2018).

Pada penelitian ini digunakan nilai *set point* sebesar 37,5°C karena merupakan suhu inkubasi optimum untuk telur ayam pada inkubator bersirkulasi udara (*forced-air incubator*). Suhu tersebut banyak digunakan sebagai acuan karena mampu mendukung perkembangan embrio secara optimal, sedangkan suhu yang terlalu rendah maupun terlalu tinggi dapat menghambat perkembangan embrio dan menurunkan daya tetas (Lourens et al., 2005).

Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan sistem monitoring suhu berbasis IoT menggunakan ESP32 dan platform Blynk (Kumar et al., 2024; Sari et al., 2024). Penelitian lain mengembangkan sistem pengendalian suhu pada mesin tetas telur menggunakan metode PID dengan penyetelan Ziegler-Nichols (Agustian et al., 2022). Namun, penelitian yang mengintegrasikan sistem monitoring suhu secara *real-time* dengan pengendalian otomatis menggunakan metode Bang-Bang Control pada inkubator mini berbasis ESP32 dan platform Blynk IoT masih relatif terbatas.

Sistem yang dikembangkan pada penelitian ini memanfaatkan sensor SHT31 untuk mengukur suhu (Sensirion AG, 2022), heater PTC 12 V 120 W sebagai sumber pemanas, kipas DC 12 V sebagai pendingin, relay sebagai aktuator, LCD I2C 16×2 sebagai tampilan lokal, serta aplikasi Blynk IoT

sebagai media monitoring jarak jauh. Melalui penerapan metode Bang-Bang Control dengan histeresis, sistem diharapkan mampu menjaga suhu di sekitar nilai *set point* 37,5°C sehingga proses monitoring dan pengendalian suhu pada inkubator mini dapat dilakukan secara otomatis dan *real-time*.

2. METODE

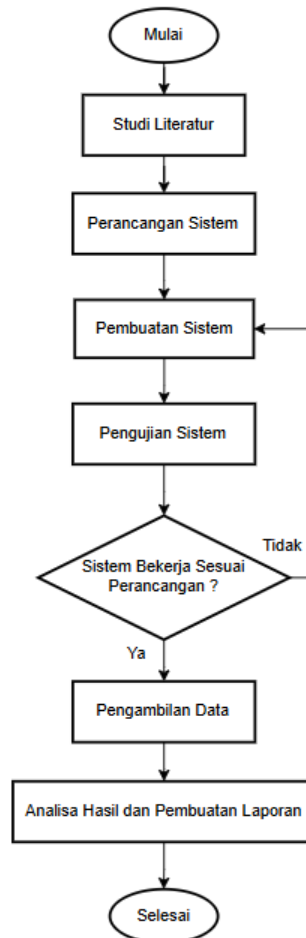
Penelitian ini berfokus pada perancangan dan implementasi sistem monitoring dan pengendalian suhu pada inkubator mini berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama dan platform Blynk IoT sebagai media pemantauan jarak jauh. Pengendalian suhu menerapkan metode Bang-Bang Control dengan histeresis untuk menjaga suhu di sekitar nilai *set point* sebesar 37,5°C. Nilai *set point* tersebut dipilih karena merupakan suhu inkubasi optimum untuk telur ayam pada inkubator bersirkulasi udara (*forced-air incubator*), sehingga mampu mendukung perkembangan embrio secara optimal (Lourens et al., 2005). Pada metode yang diterapkan, heater diaktifkan ketika suhu berada pada atau di bawah 37°C dan dinonaktifkan setelah suhu mencapai 38°C. Sebaliknya, kipas akan bekerja apabila suhu mencapai 38,5°C atau lebih, kemudian berhenti saat suhu kembali turun hingga 38°C. Penerapan histeresis bertujuan mengurangi frekuensi perubahan kondisi aktuator secara berulang (*chattering*), sehingga sistem bekerja lebih stabil dan memperpanjang umur pakai aktuator (Ogata, 2010). Sensor SHT31 digunakan untuk mengukur suhu di dalam inkubator. Data hasil pengukuran diproses oleh ESP32 untuk menentukan kondisi heater dan kipas sesuai algoritma Bang-Bang Control, kemudian ditampilkan pada LCD I2C 16×2 serta dikirimkan ke aplikasi Blynk IoT sehingga dapat dipantau secara *real-time*.

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan. Proses diawali dengan studi literatur untuk memperoleh landasan teori mengenai sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT), metode Bang-Bang Control, mikrokontroler ESP32, sensor SHT31, serta platform Blynk IoT. Referensi diperoleh dari berbagai sumber, seperti buku, jurnal ilmiah, dan dokumentasi resmi perangkat yang digunakan.

Tahap berikutnya adalah perancangan sistem yang meliputi penyusunan diagram blok, *flowchart*, perancangan perangkat keras, dan pengembangan perangkat lunak. Setelah proses perancangan selesai, seluruh komponen dirakit menjadi sebuah sistem inkubator mini sesuai dengan rancangan yang telah dibuat. Selanjutnya dilakukan pengujian setiap komponen untuk memastikan seluruh perangkat berfungsi dengan baik. Apabila ditemukan ketidaksesuaian selama pengujian, dilakukan evaluasi dan perbaikan hingga sistem bekerja sesuai dengan tujuan penelitian. Setelah seluruh fungsi sistem berjalan dengan baik, dilakukan pengambilan data selama 60 menit yang meliputi suhu, status heater, dan status kipas. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi respons awal sistem dalam menjaga suhu di sekitar nilai *set point* 37,5°C menggunakan metode Bang-Bang Control dengan histeresis. Data hasil pengujian

kemudian dianalisis untuk mengetahui kesesuaian kerja heater dan kipas terhadap logika pengendalian yang telah dirancang.



Gambar 1. Flowchart Tahap Penelitian

Keterangan:

Gambar 1 memperlihatkan tahapan penelitian yang dimulai dari studi literatur, dilanjutkan proses perancangan, pembuatan sistem, pengujian, pengambilan data, analisis hasil, hingga penyusunan laporan penelitian. Apabila hasil pengujian belum sesuai dengan rancangan, sistem diperbaiki terlebih dahulu sebelum pengambilan data dilakukan.

2.2 Alat dan Bahan

Perangkat yang digunakan pada penelitian terdiri atas komponen utama, komponen pendukung, dan sumber catu daya yang saling terintegrasi membentuk sistem inkubator mini berbasis *Internet of Things* (IoT). ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama, sedangkan sensor SHT31 berfungsi mengukur suhu di dalam inkubator sebagai masukan bagi sistem pengendalian. Pengendalian suhu dilakukan menggunakan heater PTC 12 V 120 W sebagai elemen pemanas dan kipas DC 12 V sebagai media pendingin yang dikendalikan melalui relay berdasarkan metode *Bang-Bang Control*. LCD I2C 16×2 digunakan sebagai media tampilan lokal untuk menampilkan informasi suhu dan status aktuator, sedangkan platform Blynk IoT berfungsi sebagai media monitoring secara *real-time*. Seluruh

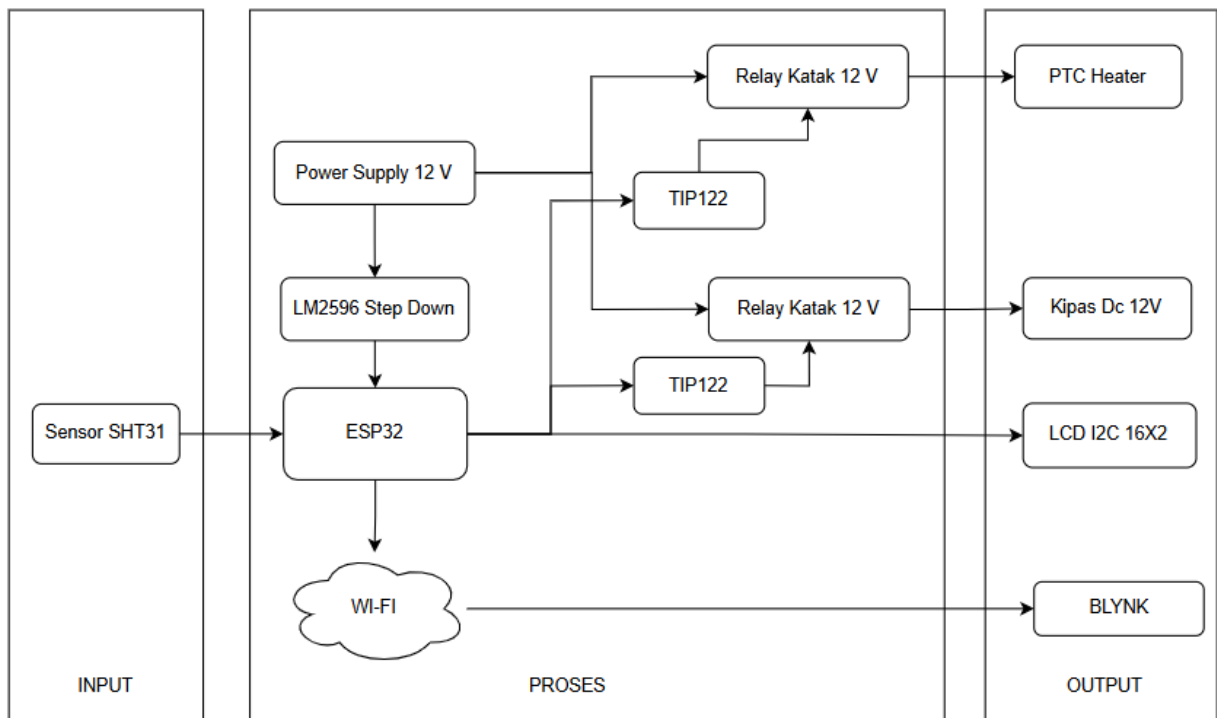
komponen memperoleh suplai tegangan dari *power supply* 12 V, sedangkan ESP32 memperoleh catu daya melalui modul LM2596 sebagai penurun tegangan.

Tabel 1. Alat dan Bahan

Alat dan Bahan	Jumlah
ESP32	1 buah
Sensor SHT31	1 buah
LCD I2C 16×2	1 buah
Relay katak 12V 20A	2 buah
Transistor TIP122ST	2 buah
Dioda IN4007	2 buah
Resistor 1 kΩ	2 buah
Heater PTC 12V 120W	1 buah
Kipas DC 12V	1 buah
LM2596	1 buah
Power Supply 12V	1 buah
PCB (<i>Printed Circuit Board</i>)	1 buah
Kabel jumper	Secukupnya

2.3 Diagram Blok Sistem

Sistem yang dirancang terdiri atas tiga bagian utama, yaitu input, proses, dan output. Pada bagian input, sensor SHT31 berfungsi mengukur suhu di dalam ruang inkubator. Data hasil pengukuran kemudian dikirimkan ke ESP32 sebagai pusat pengolahan sistem. Pada bagian proses, ESP32 menjalankan algoritma Bang-Bang Control dengan histeresis untuk mengendalikan kerja heater dan kipas berdasarkan suhu yang terbaca. Heater akan aktif ketika suhu berada pada atau di bawah 37°C dan akan berhenti bekerja ketika suhu mencapai 38°C. Sebaliknya, kipas akan aktif ketika suhu mencapai 38,5°C atau lebih dan berhenti bekerja ketika suhu kembali turun hingga 38°C. Sinyal keluaran dari ESP32 diteruskan ke rangkaian driver transistor TIP122ST dan relay untuk mengendalikan aktuator. Bagian output terdiri atas heater, kipas, LCD I2C 16×2, dan aplikasi Blynk IoT. LCD menampilkan informasi suhu serta status heater dan kipas secara langsung, sedangkan aplikasi Blynk IoT digunakan untuk memantau kondisi sistem secara *real-time* melalui jaringan internet.



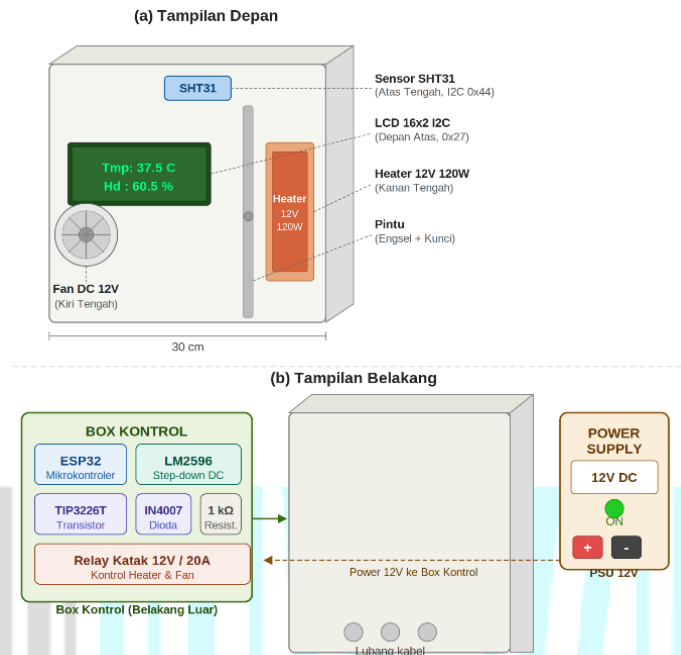
Gambar 2. Blok Diagram Sistem

Keterangan:

Diagram blok sistem menunjukkan aliran data mulai dari sensor sebagai masukan, ESP32 sebagai pengolah data, hingga heater, kipas, LCD, dan aplikasi Blynk IoT sebagai keluaran sistem.

2.4 Sketsa Rancangan Sistem

Sketsa rancangan menggambarkan tata letak setiap komponen pada inkubator mini. Sensor SHT31 ditempatkan di bagian atas ruang inkubator agar pembacaan suhu dapat merepresentasikan kondisi udara di dalam inkubator. Heater dipasang pada sisi kanan sebagai sumber panas, sedangkan kipas ditempatkan pada sisi kiri untuk membantu sirkulasi udara sekaligus menurunkan suhu ketika melebihi nilai yang ditentukan. Bagian belakang inkubator digunakan sebagai tempat panel kontrol yang berisi ESP32, relay, transistor TIP122ST, dioda IN4007, resistor, modul LM2596, serta *power supply*. Seluruh komponen tersebut bekerja secara terintegrasi sehingga proses monitoring dan pengendalian suhu dapat berlangsung secara otomatis sesuai algoritma *Bang-Bang Control*.



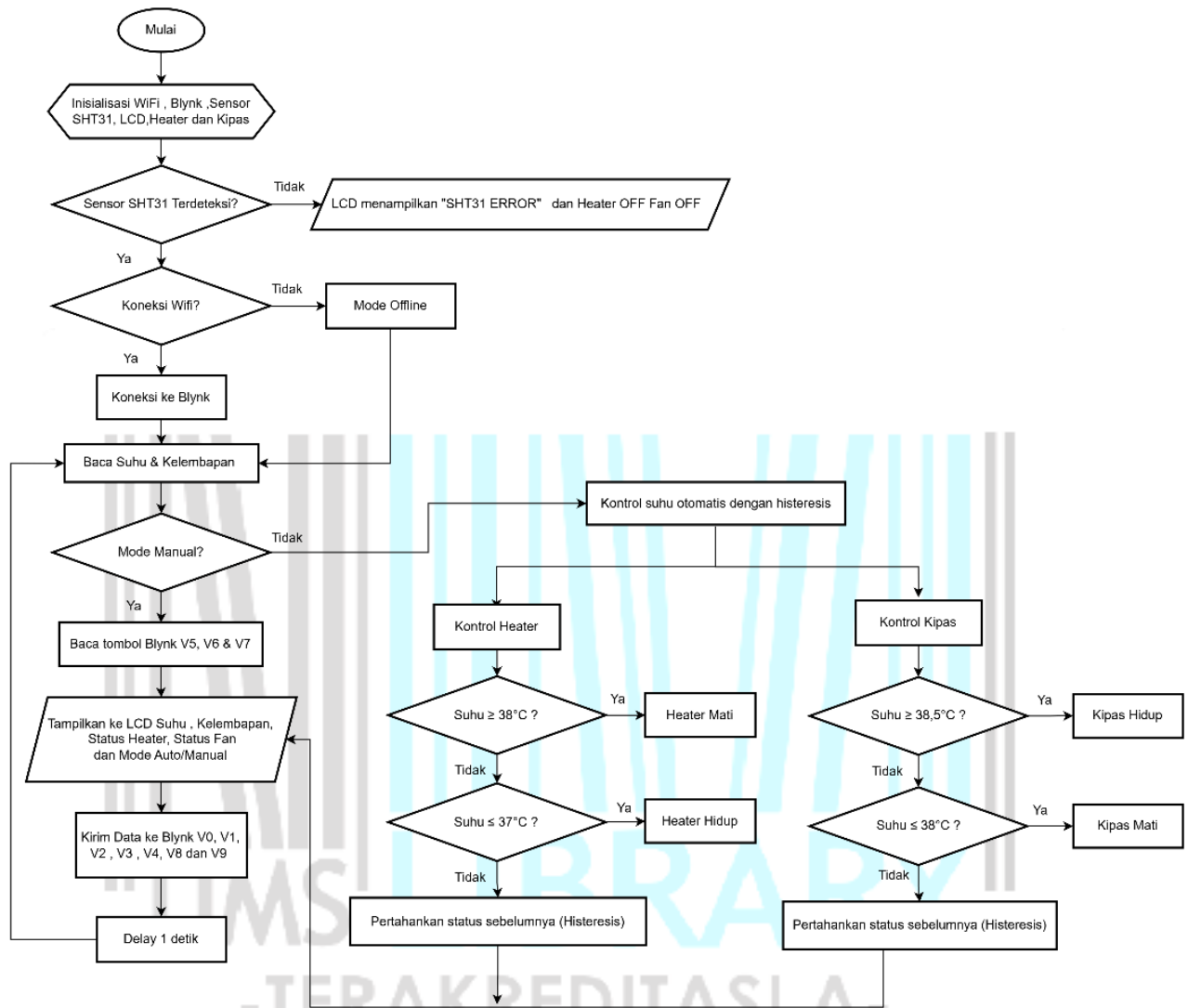
Gambar 3. Sketsa Rancangan Sistem

Keterangan:

Gambar menunjukkan tata letak seluruh komponen utama pada inkubator mini beserta panel kontrol sehingga memudahkan proses instalasi, pemeliharaan, dan pengoperasian sistem.

2.5 Flowchart Sistem

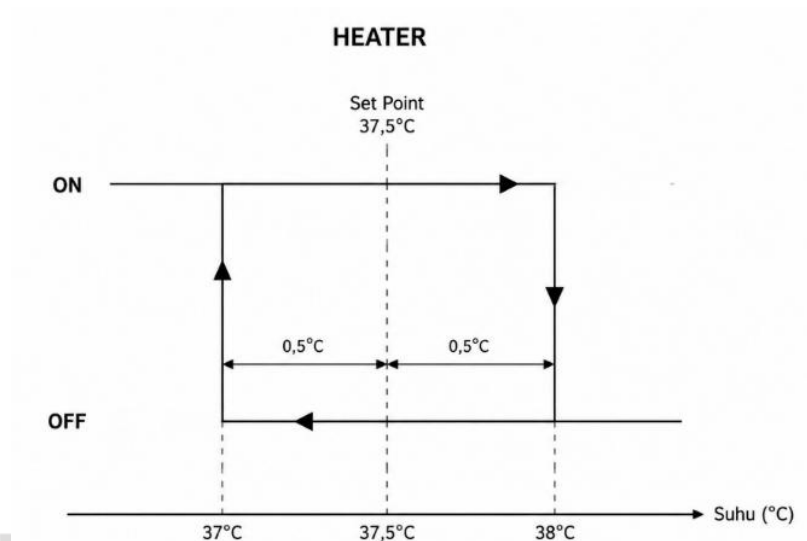
Alur kerja sistem diawali dengan proses inialisasi ESP32, sensor SHT31, LCD I2C, jaringan Wi-Fi, dan platform Blynk IoT. Setelah proses inialisasi selesai, ESP32 melakukan pemeriksaan kondisi sensor dan koneksi jaringan. Apabila sensor tidak terdeteksi, sistem menampilkan pesan kesalahan pada LCD dan seluruh aktuator dinonaktifkan. Sebaliknya, apabila koneksi internet tidak tersedia, sistem tetap menjalankan proses monitoring dan pengendalian suhu secara lokal tanpa menghentikan fungsi inkubator. Selanjutnya, sensor SHT31 mengukur suhu di dalam inkubator dan mengirimkan data hasil pembacaan ke ESP32. Data tersebut diproses menggunakan metode Bang-Bang Control dengan histeresis untuk menentukan kondisi kerja heater dan kipas. Heater diaktifkan ketika suhu berada pada atau di bawah 37°C dan dinonaktifkan ketika suhu mencapai 38°C . Sebaliknya, kipas diaktifkan ketika suhu mencapai $38,5^{\circ}\text{C}$ atau lebih dan dinonaktifkan ketika suhu turun hingga 38°C . Informasi suhu dan status aktuator kemudian ditampilkan pada LCD I2C 16×2 serta dikirimkan ke aplikasi Blynk IoT untuk proses monitoring secara *real-time*. Seluruh proses berlangsung secara berulang sehingga suhu inkubator tetap berada di sekitar nilai *set point* $37,5^{\circ}\text{C}$.



Gambar 4. Flowchart Sistem

Keterangan:

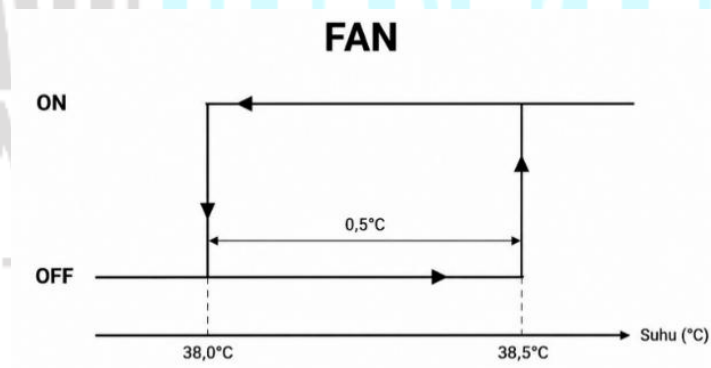
Flowchart sistem menjelaskan urutan kerja perangkat mulai dari inisialisasi, pembacaan sensor, pengambilan keputusan menggunakan metode Bang-Bang Control, hingga proses monitoring secara real-time melalui LCD dan aplikasi Blynk IoT



Gambar 5. Diagram Histeresis Heater

Keterangan:

Diagram histeresis heater menunjukkan mekanisme kerja pemanas pada metode Bang-Bang Control. Heater menyala pada suhu $\leq 37^{\circ}\text{C}$ dan mati pada suhu $\geq 38^{\circ}\text{C}$. Pada rentang 37°C – 38°C , status heater dipertahankan (*histeresis*) untuk mencegah *chattering*.



Gambar 6. Diagram Histeresis Kipas

Keterangan:

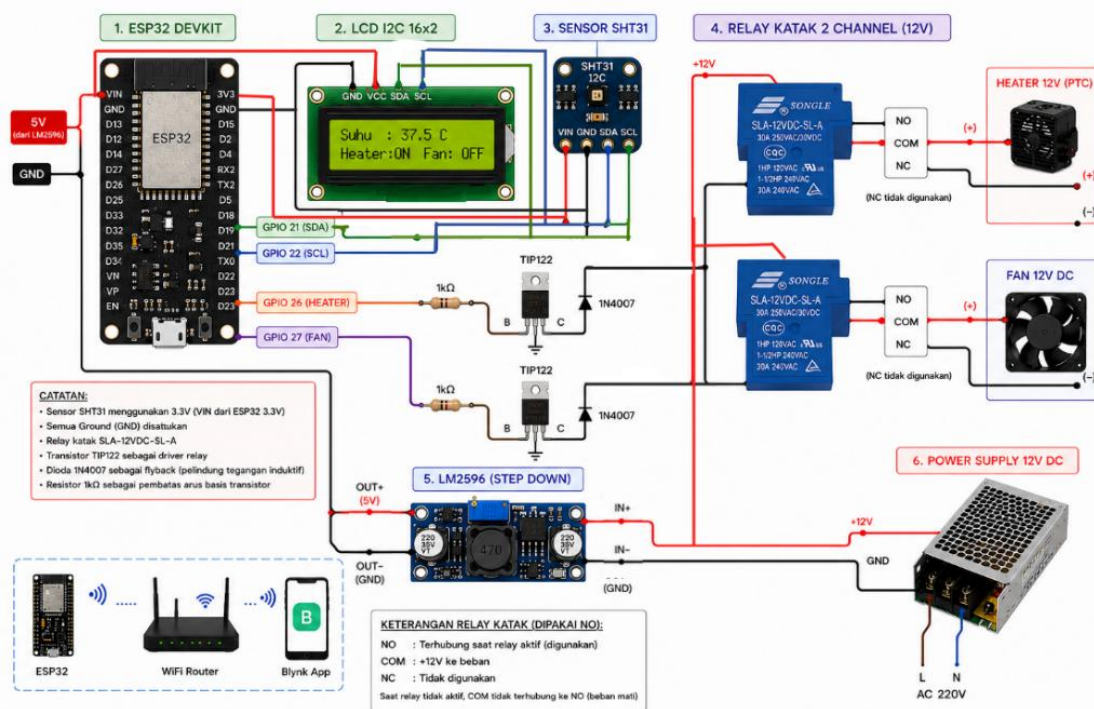
Diagram histeresis kipas menunjukkan mekanisme kerja sistem pendingin pada metode Bang-Bang Control. Kipas menyala pada suhu $\geq 38,5^{\circ}\text{C}$ dan mati pada suhu $\leq 38^{\circ}\text{C}$. Pada rentang 38°C – $38,5^{\circ}\text{C}$, status kipas dipertahankan (*histeresis*) untuk mencegah *chattering*.

2.6 Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras dilakukan dengan mengintegrasikan seluruh komponen elektronika menjadi satu sistem inkubator mini berbasis ESP32. ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama yang mengolah data hasil pembacaan sensor, menjalankan algoritma Bang-Bang Control, serta mengirimkan informasi ke platform Blynk IoT melalui jaringan Wi-Fi. Sensor SHT31 digunakan untuk mengukur suhu di dalam ruang inkubator sebagai masukan bagi sistem pengendalian. Data hasil pengukuran

kemudian diproses oleh ESP32 untuk menentukan kondisi kerja heater dan kipas sesuai logika pengendalian yang telah dirancang. Informasi mengenai suhu, status heater, status kipas, dan mode operasi ditampilkan pada LCD I2C 16×2 sehingga pengguna dapat memantau kondisi sistem secara langsung tanpa harus membuka aplikasi Blynk IoT.

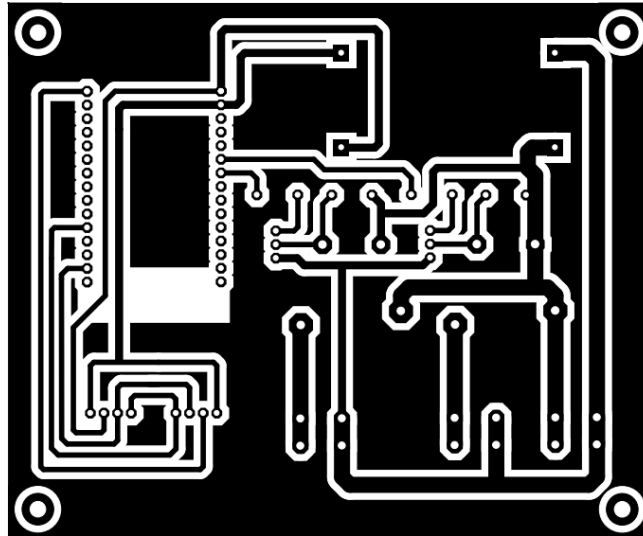
Sistem aktuator terdiri atas heater PTC 12 V sebagai sumber pemanas dan kipas DC 12 V sebagai media pendingin. Kedua aktuator dikendalikan menggunakan relay dua kanal yang digerakkan oleh rangkaian driver berbasis transistor TIP122ST, resistor 1 k Ω , dan dioda IN4007 sebagai pelindung terhadap tegangan balik (*back electromotive force*) yang dihasilkan oleh kumparan relay. Seluruh rangkaian memperoleh sumber tegangan dari *power supply* 12 V DC. Tegangan tersebut kemudian diturunkan menjadi 5 V menggunakan modul LM2596 agar sesuai dengan kebutuhan catu daya ESP32. Untuk meningkatkan kerapian instalasi, mempermudah proses perakitan, serta memudahkan pemeliharaan sistem, seluruh komponen dipasang pada Printed Circuit Board (PCB).



Gambar 7. Wiring Diagram

Keterangan:

Wiring diagram memperlihatkan hubungan antarperangkat pada sistem inkubator mini, mulai dari ESP32, sensor SHT31, LCD I2C, rangkaian driver relay, heater, kipas, modul LM2596, hingga power supply sebagai sumber catu daya.



Gambar 8. Rancangan Jalur PCB

Keterangan:

Rancangan jalur PCB menunjukkan tata letak komponen dan jalur penghantar yang digunakan sebagai acuan dalam proses pembuatan rangkaian sehingga pemasangan perangkat menjadi lebih rapi, stabil, dan mudah dipelihara.

2.7 Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C++. Program dirancang untuk mengatur komunikasi antara ESP32, sensor SHT31, LCD I2C 16×2, dan platform Blynk IoT melalui jaringan Wi-Fi. Program diawali dengan proses inisialisasi seluruh perangkat yang digunakan. Setelah proses inisialisasi selesai, ESP32 melakukan pembacaan suhu secara berkala, kemudian memproses data tersebut menggunakan metode Bang-Bang Control dengan histeresis untuk menentukan kondisi kerja heater dan kipas.

Sistem menyediakan dua mode operasi, yaitu mode manual dan mode otomatis. Pada mode manual, pengguna dapat mengaktifkan atau menonaktifkan heater maupun kipas melalui aplikasi Blynk IoT. Sementara itu, pada mode otomatis, seluruh proses pengendalian dilakukan oleh ESP32 berdasarkan nilai suhu yang diperoleh dari sensor SHT31 sesuai dengan algoritma Bang-Bang Control. Hasil pembacaan suhu, status heater, status kipas, dan mode operasi ditampilkan pada LCD I2C 16×2 serta dikirimkan ke aplikasi Blynk IoT secara *real-time*. Dengan demikian, pengguna dapat memantau kondisi inkubator dari lokasi yang berbeda selama tersedia akses internet.

2.8 Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem monitoring dan pengendalian suhu yang telah dikembangkan. Seluruh pengujian dilaksanakan selama 60 menit dengan set point suhu sebesar 37,5°C. Parameter yang diamati meliputi suhu, status heater, status kipas, tampilan LCD I2C 16×2, serta data monitoring pada aplikasi Blynk IoT. Selain itu, respons sistem terhadap perubahan suhu juga

diamati untuk memastikan metode Bang-Bang Control dengan histeresis bekerja sesuai dengan logika pengendalian yang telah dirancang. Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi respons sistem dalam mengendalikan suhu di sekitar nilai *set point*, mengamati perubahan status heater dan kipas selama proses pengendalian, serta memastikan proses monitoring melalui aplikasi Blynk IoT berlangsung secara *real-time*.

2.9 Perhitungan Error Sensor

Perhitungan *error* dilakukan untuk mengetahui tingkat kesalahan pembacaan suhu oleh sensor SHT31 dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan termometer digital sebagai nilai referensi. Persentase *error* dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\% \text{ Error} = \frac{|\text{Nilai Referensi} - \text{Nilai Sensor}|}{\text{Nilai Referensi}} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

- Nilai Referensi = nilai suhu yang diperoleh dari termometer digital (°C)
- Nilai Sensor = nilai suhu yang dibaca oleh sensor SHT31 (°C)

Selain menggunakan persentase *error*, evaluasi kinerja sensor juga dilakukan menggunakan Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), dan standar deviasi. Ketiga parameter tersebut digunakan untuk memberikan gambaran mengenai tingkat akurasi dan kestabilan hasil pengukuran sensor SHT31 terhadap nilai referensi.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_{\text{sensor},i} - T_{\text{referensi},i}| \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{\text{sensor},i} - T_{\text{referensi},i})^2} \quad (3)$$

Keterangan:

- T_{sensor} = suhu yang diukur sensor SHT31 (°C)
- $T_{\text{referensi}}$ = suhu yang diukur termometer digital (°C)
- n = jumlah data pengukuran.

Nilai MAE menunjukkan rata-rata selisih absolut antara hasil pengukuran sensor SHT31 dan termometer digital. Semakin kecil nilai MAE, semakin tinggi tingkat akurasi sensor. Nilai RMSE memberikan informasi mengenai besar penyimpangan hasil pengukuran sensor terhadap nilai referensi

dengan memberikan bobot yang lebih besar pada kesalahan yang tinggi. Semakin kecil nilai RMSE, semakin baik performa sensor

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

Keterangan:

- x_i = data suhu sensor ($^{\circ}\text{C}$)
- $\bar{x}$ = rata-rata suhu sensor ($^{\circ}\text{C}$)
- n = jumlah data.

Standar deviasi digunakan untuk mengetahui tingkat penyebaran hasil pengukuran sensor terhadap nilai rata-ratanya. Nilai standar deviasi yang kecil menunjukkan bahwa hasil pengukuran sensor memiliki tingkat kestabilan yang baik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perancangan Sistem

Inkubator mini berhasil dikembangkan dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali sistem. Sensor SHT31 digunakan untuk mengukur suhu di dalam ruang inkubator. Data hasil pengukuran diproses oleh ESP32, kemudian ditampilkan pada LCD I2C 16×2 serta dikirim ke platform Blynk IoT melalui jaringan Wi-Fi sehingga dapat dipantau secara *real-time*. Sistem menggunakan heater PTC 12 V 120 W sebagai sumber pemanas dan kipas DC 12 V sebagai media pendingin yang dikendalikan melalui relay dua kanal.

Perancangan sistem terdiri atas tiga bagian utama, yaitu masukan (*input*), proses, dan keluaran (*output*). Pada bagian masukan, sensor SHT31 mengukur suhu di dalam inkubator dan mengirimkan data ke ESP32. Selanjutnya, ESP32 memproses data tersebut menggunakan metode Bang-Bang Control dengan histeresis untuk mengendalikan kerja heater dan kipas. Heater diaktifkan ketika suhu berada pada atau di bawah 37°C dan dinonaktifkan ketika suhu mencapai 38°C , sedangkan kipas diaktifkan ketika suhu mencapai $38,5^{\circ}\text{C}$ atau lebih dan dinonaktifkan ketika suhu turun hingga 38°C . Penerapan histeresis bertujuan mengurangi *chattering* sehingga perpindahan kondisi aktuator tidak terjadi secara berulang dalam waktu singkat.

Bagian keluaran terdiri atas heater, kipas, LCD I2C 16×2, dan aplikasi Blynk IoT. LCD menampilkan informasi suhu, status heater, status kipas, dan mode operasi secara langsung, sedangkan aplikasi Blynk IoT menampilkan data monitoring secara *real-time* melalui jaringan internet. Berdasarkan hasil implementasi, seluruh komponen dapat bekerja sesuai dengan fungsi yang dirancang dan mampu menjalankan proses monitoring serta pengendalian suhu pada inkubator mini.

3.2 Hasil Implementasi Sistem

Implementasi sistem dilakukan dengan mengintegrasikan seluruh perangkat keras dan perangkat lunak menjadi satu sistem inkubator mini berbasis ESP32. Sistem terdiri atas sensor SHT31 sebagai pengukur suhu, heater PTC 12 V 120 W sebagai sumber pemanas, kipas DC 12 V sebagai media pendingin, relay dua kanal sebagai pengendali aktuator, LCD I2C 16×2 sebagai media tampilan lokal, serta platform Blynk IoT sebagai media monitoring jarak jauh. ESP32 berfungsi sebagai pusat pengendali yang memproses data hasil pengukuran sensor SHT31. Data suhu kemudian ditampilkan pada LCD I2C 16×2 dan dikirimkan ke aplikasi Blynk IoT melalui jaringan Wi-Fi secara *real-time*.

Sistem menerapkan metode Bang-Bang Control dengan histeresis untuk mengendalikan kerja heater dan kipas berdasarkan suhu yang terukur. Heater diaktifkan ketika suhu berada pada atau di bawah 37°C dan dinonaktifkan ketika suhu mencapai 38°C. Sebaliknya, kipas diaktifkan ketika suhu mencapai 38,5°C atau lebih dan dinonaktifkan ketika suhu turun hingga 38°C. Penerapan histeresis bertujuan mengurangi *chattering* sehingga perpindahan kondisi aktuator tidak terjadi secara berulang dalam waktu singkat.

Tampilan keseluruhan inkubator mini ditunjukkan pada Gambar 9. Inkubator dibuat menggunakan rangka kayu multipleks berbentuk kubus. Pada bagian depan terdapat LCD I2C 16×2 yang menampilkan informasi suhu, status heater, status kipas, dan mode operasi. Bagian belakang digunakan sebagai panel kontrol, sedangkan sisi kanan dan kiri menunjukkan bentuk fisik inkubator yang telah direalisasikan.

(a) Tampak Depan



(b) Tampak Belakang



(c) Tampak Samping Kanan



(d) Tampak Samping Kiri

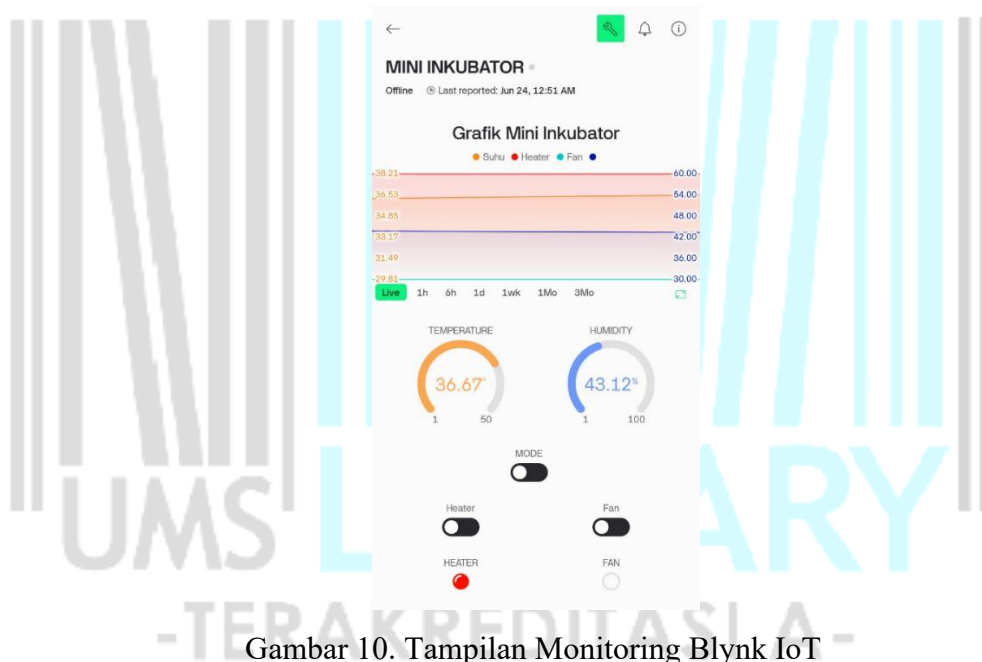


Gambar 9. Tampilan Keseluruhan Inkubator mini

Keterangan:

Gambar 9 menunjukkan tampilan keseluruhan inkubator mini yang terdiri atas (a) tampak depan, (b) tampak belakang, (c) tampak samping kanan, dan (d) tampak samping kiri. Inkubator dibuat menggunakan rangka kayu multipleks dengan desain yang ringkas sehingga memudahkan proses pengoperasian serta penempatan komponen.

Monitoring sistem dilakukan menggunakan aplikasi Blynk IoT yang menampilkan nilai suhu, kelembapan, status heater, status kipas, serta mode operasi secara real-time. Tampilan monitoring ditunjukkan pada Gambar 10.

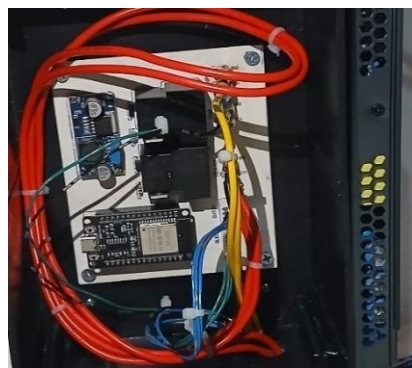


Gambar 10. Tampilan Monitoring Blynk IoT

Keterangan:

Aplikasi Blynk IoT menampilkan data suhu, kelembapan, status heater, status kipas, serta menyediakan pilihan mode manual dan mode otomatis sehingga pengguna dapat memantau dan mengendalikan sistem dari jarak jauh.

Panel kontrol sistem ditunjukkan pada Gambar 11. Panel ini berfungsi sebagai pusat pengendalian yang mengintegrasikan seluruh rangkaian elektronika pada inkubator mini.



Gambar 11. Panel Kontrol Sistem

Keterangan:

Panel kontrol berisi ESP32 sebagai pengendali utama, modul LM2596 sebagai penurun tegangan, relay dua kanal sebagai pengendali heater dan kipas, serta rangkaian driver yang terdiri atas transistor TIP122ST, dioda IN4007, dan resistor 1 k Ω . Seluruh komponen dipasang pada PCB di dalam box panel sehingga instalasi menjadi lebih rapi, aman, dan memudahkan proses perawatan.

Bagian dalam inkubator mini ditunjukkan pada Gambar 12. Penempatan komponen di dalam ruang inkubator dirancang agar distribusi suhu menjadi lebih merata selama proses pengoperasian.



Gambar 12. Bagian Dalam Inkubator mini

Keterangan:

Bagian dalam inkubator terdiri atas heater PTC sebagai sumber pemanas, kipas DC sebagai pendingin sekaligus sirkulasi udara, serta sensor SHT31 yang digunakan untuk membaca suhu dan kelembapan di dalam ruang inkubator.

Berdasarkan hasil implementasi, seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak berhasil bekerja sesuai dengan fungsi yang dirancang serta saling terintegrasi dengan baik. Sistem mampu melakukan monitoring suhu secara *real-time* melalui aplikasi Blynk IoT dan mengendalikan heater serta kipas menggunakan metode Bang-Bang Control dengan histeresis.

3.3 Hasil Pengujian Sistem

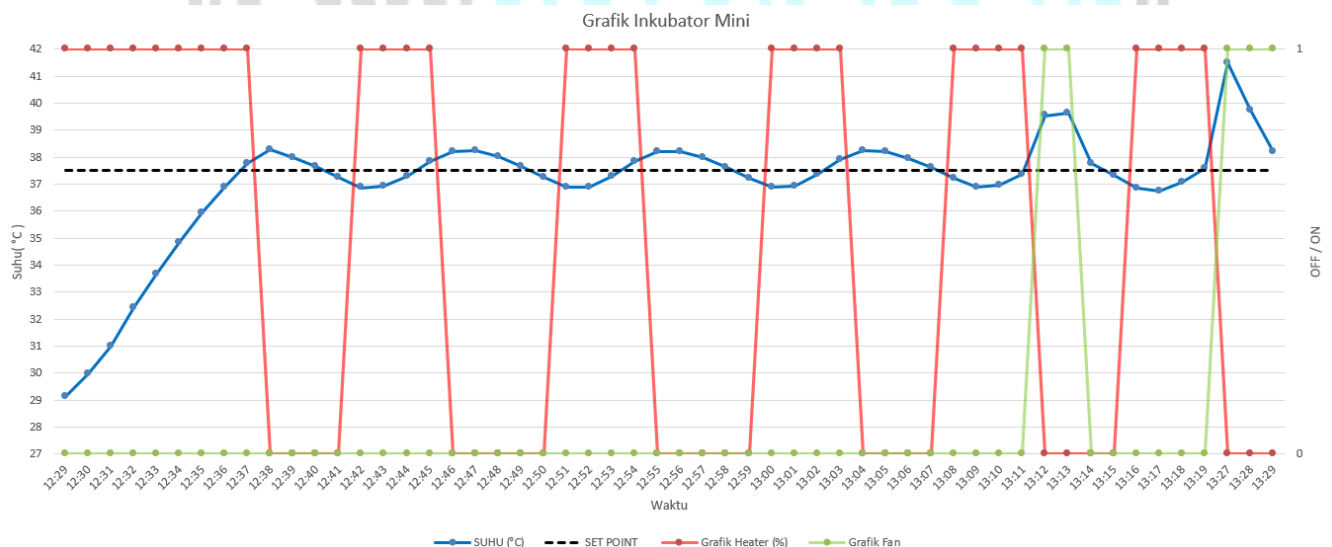
Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem monitoring dan pengendalian suhu pada inkubator mini berbasis ESP32 menggunakan metode Bang-Bang Control dengan histeresis. Pengujian dilaksanakan selama 60 menit, dimulai pada pukul 12.29 hingga 13.29, dengan set point suhu sebesar 37,5°C. Parameter yang diamati meliputi perubahan suhu di dalam inkubator, status kerja heater dan kipas, serta tampilan data pada LCD I2C 16×2 dan aplikasi Blynk IoT.

Pada awal pengujian pukul 12.29, suhu di dalam inkubator sebesar 29°C sehingga heater diaktifkan untuk meningkatkan suhu menuju *set point*. Suhu meningkat secara bertahap dan mencapai sekitar 38°C pada pukul 12.38, sehingga heater dinonaktifkan secara otomatis sesuai logika Bang-Bang Control. Selanjutnya, suhu menurun secara perlahan akibat pelepasan panas ke lingkungan. Ketika suhu

mencapai sekitar 37°C pada pukul 12.42, heater kembali diaktifkan untuk mempertahankan suhu di sekitar *set point*. Proses tersebut berlangsung secara berulang selama pengujian sehingga suhu tetap berada pada rentang pengendalian yang telah ditentukan.

Untuk mengevaluasi respons sistem terhadap kondisi suhu berlebih, dilakukan simulasi gangguan suhu pada sekitar pukul 13.12 dan 13.24. Simulasi tersebut menyebabkan suhu meningkat hingga melebihi 38,5°C, sehingga kipas aktif secara otomatis untuk membantu menurunkan suhu di dalam inkubator. Setelah suhu kembali turun hingga 38°C, kipas berhenti bekerja dan sistem kembali menjalankan proses pengendalian sesuai logika Bang-Bang Control.

Selama pengujian berlangsung, heater dan kipas bekerja sesuai dengan logika pengendalian yang telah dirancang serta tidak pernah aktif secara bersamaan. Selain itu, data suhu, status heater, dan status kipas berhasil ditampilkan pada LCD I2C 16×2 dan dikirimkan ke aplikasi Blynk IoT secara *real-time*. Hasil monitoring suhu selama pengujian ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Grafik Monitoring Suhu, Set Point, Heater, dan Fan Selama 60 Menit

Keterangan:

Gambar 13 menunjukkan hasil monitoring suhu selama pengujian selama 60 menit. Grafik memperlihatkan perubahan suhu terhadap set point 37,5°C serta status kerja heater dan kipas. Terlihat bahwa metode Bang-Bang Control dengan histeresis mampu mengendalikan suhu pada rentang pengendalian yang telah ditentukan. Kenaikan suhu di atas 38,5°C merupakan simulasi gangguan suhu untuk menguji respons sistem terhadap kondisi suhu berlebih sehingga kipas aktif secara otomatis.

Tabel 2. Kondisi Kerja Sistem

Rentang Suhu	Heater	Fan	Keterangan
$\leq 37^{\circ}\text{C}$	ON	OFF	Proses pemanasan
$37,1^{\circ}\text{C} - 37,9^{\circ}\text{C}$	OFF	OFF	Kondisi stabil
$38,0^{\circ}\text{C} - 38,4^{\circ}\text{C}$	OFF	OFF	Daerah transisi
$\geq 38,5^{\circ}\text{C}$	OFF	ON	Proses pendinginan

Keterangan:

Tabel 2 menunjukkan logika kerja sistem berdasarkan rentang suhu yang telah ditentukan. Heater aktif pada suhu $\leq 37^{\circ}\text{C}$ untuk meningkatkan suhu di dalam inkubator, sedangkan kipas aktif pada suhu $\geq 38,5^{\circ}\text{C}$ untuk membantu menurunkan suhu. Pada rentang $37,1^{\circ}\text{C} - 38,4^{\circ}\text{C}$ kedua aktuatur berada dalam kondisi tidak aktif sebagai daerah histeresis sehingga perpindahan kerja heater dan kipas berlangsung lebih stabil.

Tabel 3. Perbandingan Hasil Pengukuran Suhu Sensor SHT31 dan Termometer Digital

Suhu SHT31 ($^{\circ}\text{C}$)	Suhu Termometer Digital ($^{\circ}\text{C}$)	Selisih ($^{\circ}\text{C}$)
35,71	35,30	0,41
36,29	36,90	0,61
36,33	36,80	0,47
36,36	36,00	0,36
36,77	36,50	0,27
37,18	37,10	0,08
37,41	37,20	0,21
37,80	37,70	0,10
38,00	37,90	0,10
38,50	38,40	0,10

Keterangan:

Tabel 3 menunjukkan hasil perbandingan pengukuran suhu antara sensor SHT31 dan termometer digital sebagai alat ukur referensi. Selisih pengukuran berkisar antara $0,08^{\circ}\text{C}$ hingga $0,61^{\circ}\text{C}$, dengan selisih terbesar sebesar $0,61^{\circ}\text{C}$ dan selisih terkecil sebesar $0,08^{\circ}\text{C}$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembacaan sensor SHT31 memiliki kedekatan yang baik terhadap alat ukur referensi sehingga layak

digunakan untuk monitoring suhu pada mini inkubator.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Error Sensor SHT31

Suhu SHT31 (°C)	Suhu Termometer Digital (°C)	Error (%)
35,71	35,30	1,16
36,29	36,90	1,65
36,33	36,80	1,28
36,36	36,00	1,00
36,77	36,50	0,74
37,18	37,10	0,22
37,41	37,20	0,56
37,80	37,70	0,27
38,00	37,90	0,26
38,50	38,40	0,26

Keterangan:

Tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan *error* pembacaan sensor SHT31 terhadap termometer digital. Nilai *error* berada pada rentang 0,22% hingga 1,65% dengan rata-rata *error* sebesar 0,74%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa penyimpangan hasil pengukuran sensor relatif kecil sehingga sensor SHT31 memiliki tingkat akurasi yang baik untuk digunakan pada sistem monitoring suhu mini inkubator.

Tabel 5. Hasil Analisis Akurasi Sensor

Parameter	Nilai
Error rata – rata (%)	0,74
zMAE (°C)	0,271
RMSE (°C)	0,323
Standar Deviasi (°C)	0,892

Keterangan:

Tabel 5 menunjukkan hasil analisis akurasi sensor SHT31 berdasarkan nilai *error* rata-rata, *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan standar deviasi. Nilai MAE sebesar

0,271°C menunjukkan bahwa rata-rata selisih pengukuran sensor terhadap termometer digital relatif kecil. Nilai RMSE sebesar 0,323°C mengindikasikan penyimpangan hasil pengukuran yang rendah, sedangkan standar deviasi sebesar 0,892°C menunjukkan bahwa variasi hasil pengukuran selama pengujian masih berada dalam batas yang baik. Berdasarkan hasil tersebut, sensor SHT31 memiliki akurasi yang baik dan layak digunakan sebagai sensor monitoring suhu pada sistem inkubator mini.

4. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem inkubator mini berbasis ESP32 dengan platform Blynk IoT berhasil melakukan monitoring dan pengendalian suhu secara otomatis menggunakan metode Bang-Bang Control dengan histeresis. Sistem mampu mengendalikan suhu di sekitar *set point* 37,5°C, dengan heater aktif pada suhu $\leq 37^\circ\text{C}$ dan nonaktif pada suhu $\geq 38^\circ\text{C}$, sedangkan kipas aktif pada suhu $\geq 38,5^\circ\text{C}$ dan nonaktif ketika suhu kembali mencapai 38°C. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data suhu serta status heater dan kipas dapat ditampilkan secara *real-time* melalui LCD I2C 16×2 dan aplikasi Blynk IoT. Selain itu, hasil pengujian sensor SHT31 menunjukkan nilai *error* sebesar 0,22%–1,65% dengan rata-rata *error* 0,74%, sehingga sensor memiliki akurasi yang baik dan layak digunakan untuk monitoring suhu pada sistem inkubator mini.

4.2 Saran

Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem dengan menambahkan mekanisme pembalik telur otomatis serta fitur pencatatan data (*data logging*) untuk menyimpan hasil monitoring dalam jangka waktu yang lebih lama. Selain itu, sistem dapat dikembangkan dengan menerapkan metode pengendalian yang lebih adaptif, menambahkan fitur notifikasi pada aplikasi Blynk IoT ketika suhu berada di luar batas yang ditentukan, serta melakukan pengujian menggunakan telur agar kinerja inkubator mini dapat dievaluasi secara lebih nyata.

PERSANTUNAN

Puji syukur ke hadirat Allah Swt. atas rahmat dan karunia-Nya sehingga artikel ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih kepada orang tua dan keluarga atas doa serta dukungannya, kepada Bapak Fajar Suryawan, S.T., M.Eng.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing atas bimbingan dan arahnya, serta kepada seluruh dosen dan tenaga kependidikan Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta. Semoga artikel ilmiah ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya

DAFTAR PUSTAKA

- Agustian, I., Prakoso, D. S., Faurina, R., & Daratha, N. (2022). Sistem Kendali Suhu Mesin Tetes Telur Ayam Buras Menggunakan Kontroler PID dengan Metode Tuning Ziegler Nichols Open Loop Step Response. *Jurnal Amplifier : Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Elektro Dan Komputer*, 12(1), 1–5. <https://doi.org/10.33369/jamplifier.v12i1.21535>
- Blynk Inc. (2024). *Blynk IoT Documentation*. <https://docs.blynk.io>
- Espressif Systems. (2023). *ESP32 Series Datasheet*.
- Hidayat, D., Rahmatika, M., Syafei, N. S., & Tumbelaka, B. Y. (2018). Simulasi Pengontrol On/Off pada Sistem Kendali Umpan Balik dengan Model Fisis Elektronik. *TELKA - Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi Dan Kontrol*, 4(1), 43–53. <https://doi.org/10.15575/telka.v4n1.43-53>
- Kumar, J. B., Charan, B., Kumar, G. V., Sunil, C., & Sumithabhashini, P. (2024). IoT Based Temperature Monitoring System Using ESP8266 & Blynk App. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 6(1), 1–5. www.ijfmr.com
- Lourens, A., Brand, H. Van Den, Meijerhof, R., & Kemp, B. (2017). *PHYSIOLOGY, ENDOCRINOLOGY, AND REPRODUCTION Effect of Eggshell Temperature During Incubation on Embryo Development, Hatchability, and Posthatch Development*. October, 914–920.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- Rifqi, K. S., Irawan, I., Irawan, H., Novita, I., & Chandra, J. C. (2025). Sistem Monitoring Dan Early Warning Suhu Serta Kelembapan Ruang Server Berbasis IOT Dengan Ambang Batas Real-Time Yang Dapat Disesuaikan Melalui Aplikasi Seluler. *Bit (Fakultas Teknologi Informasi Universitas Budi Luhur)*, 22(1), 88–96. <https://doi.org/10.36080/bit.v22i1.4021>
- Sari, E. K., Hendrawan, A. T., & Dwiyan, W. (2024). Rancang Bangun dan Implementasi Alat Monitoring Suhu dan Kelembaban Otomatis Berbasis Blynk IoT pada Hidroponik Indoor untuk Persemaian Tanaman Selada. *JTPT: Jurnal Teknik Pertanian Terapan*, 2(1), 18–26.
- Sensirion AG. (2022). *SHT3x-DIS Humidity and Temperature Sensor Datasheet*.