

# Monitoring Udara Berbasis Internet of Things dengan Metode Proportional Integral Derivative (PID) Untuk Kendali Tekanan pada Ruang Operasi di Rumah Sakit

Danang Adi Prabowo<sup>\*1</sup>, Bustanul Arifin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Universitas Islam Sultan Agung

e-mail: <sup>\*1</sup> [danang021@gmail.com](mailto:danang021@gmail.com), <sup>2</sup> [bustanul@unissula.ac.id](mailto:bustanul@unissula.ac.id)

## Abstrak

Pengendalian suhu, kelembaban, dan tekanan udara pada ruang operasi rumah sakit merupakan aspek penting untuk menjaga sterilitas, mencegah penyebaran infeksi, serta memberikan kenyamanan bagi tenaga medis dan pasien. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring udara berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan metode Proportional Integral Derivative (PID) sebagai kendali tekanan udara di Ruang Operasi Rumah Sakit Pandan Arang Kabupaten Boyolali. Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengolahan data, sensor SHT-10 untuk pengukuran suhu dan kelembaban, sensor LWLP5000-5XD untuk tekanan udara, serta aktuator sebagai pengatur kestabilan tekanan. Data hasil pemantauan ditampilkan melalui web-based application sehingga dapat diakses secara real-time tanpa keterbatasan perangkat dan lokasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pemantauan suhu, kelembaban, dan tekanan udara secara akurat sesuai standar Permenkes No. 7 Tahun 2019, dengan pengendalian tekanan udara yang lebih stabil melalui penerapan algoritma PID. Dengan demikian, rancangan ini diharapkan dapat membantu pihak rumah sakit dalam menjaga kualitas udara ruang operasi secara efisien, mencegah infeksi silang, serta meningkatkan kenyamanan dan keselamatan tenaga medis maupun pasien.

**Kata kunci**—Internet of Things; Monitoring Udara; PID; Ruang Operasi; Aplikasi Berbasis Web.

## Abstract

*Controlling temperature, humidity, and air pressure in hospital operating rooms is essential to maintain sterility, prevent infection spread, and ensure comfort for medical staff and patients. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based air monitoring system with a Proportional Integral Derivative (PID) control method for air pressure regulation in the Operating Room of Pandan Arang Hospital, Boyolali Regency. The system was developed using an ESP32 microcontroller as the central processing unit, an SHT-10 sensor for temperature and humidity measurement, an LWLP5000-5XD sensor for air pressure, and actuators to stabilize pressure levels. Monitoring data is displayed through a web-based application, allowing real-time access without device or location limitations. The results indicate that the system effectively monitors temperature, humidity, and air pressure in accordance with the standards of the Indonesian Ministry of Health Regulation No. 7 of 2019, with improved air pressure stability achieved through the application of the PID algorithm. Therefore, this design is expected to assist hospitals in maintaining air quality in operating rooms efficiently, preventing cross-infections, and enhancing both medical staff and patient safety and comfort.*

**Keywords**— *Internet of Things, Air Monitoring, PID, Operating Room, Web-Based Application.*

## 1. PENDAHULUAN

Ruang operasi rumah sakit merupakan salah satu area dengan standar lingkungan paling ketat karena berhubungan langsung dengan keselamatan pasien dan kenyamanan tenaga medis. Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 7 Tahun 2019 menegaskan bahwa suhu ruang operasi harus berada pada kisaran 22–27°C, kelembaban 40–60% RH, serta tekanan udara lebih tinggi daripada area di luar ruangan. Standar tersebut bertujuan mencegah pertumbuhan kuman, bakteri, virus, maupun jamur serta mengurangi risiko masuknya partikel debu dari luar ruangan

Ketidakstabilan suhu, kelembaban, dan tekanan udara dapat menimbulkan risiko serius, seperti hipotermia pada pasien, kelelahan dan dehidrasi pada tenaga medis, pertumbuhan mikroorganisme, hingga gangguan fungsi peralatan medis sensitif. Sistem HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) dengan filtrasi HEPA umumnya digunakan sebagai solusi. Namun, metode ini membutuhkan biaya operasional tinggi dan pemantauan manual yang belum tentu efisien

Seiring perkembangan teknologi, pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan ruang operasi secara real-time, terintegrasi, dan dapat diakses melalui berbagai perangkat. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem monitoring berbasis IoT untuk suhu dan kelembaban, tetapi belum sepenuhnya mengintegrasikan kontrol tekanan udara. Selain itu, teknologi Fuzzy Logic dan PID telah digunakan untuk pengendalian, di mana metode PID terbukti lebih halus dan akurat dalam menjaga kestabilan tekanan

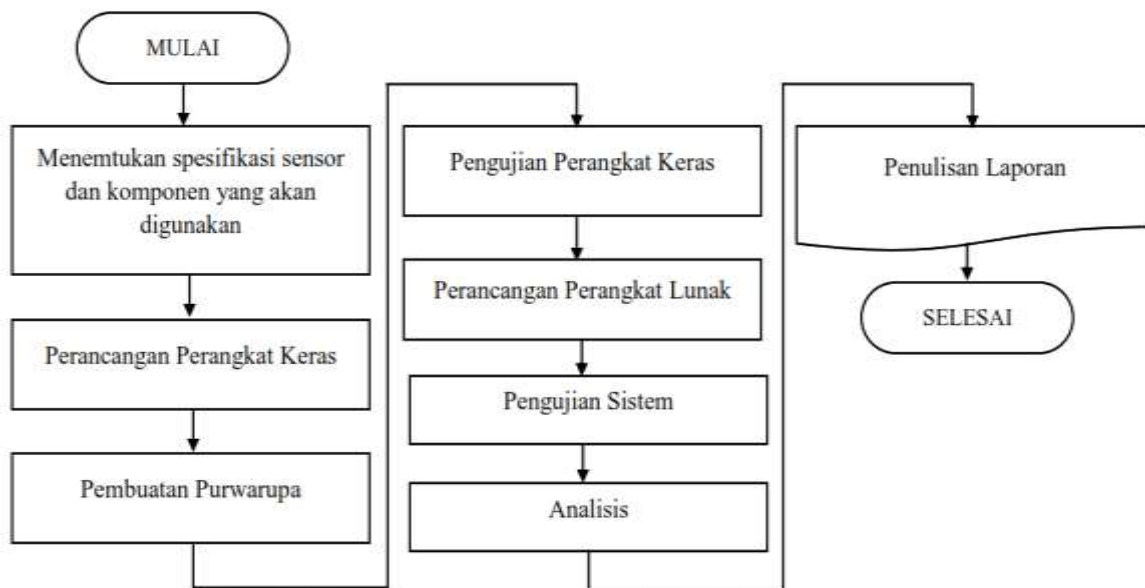
Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan perancangan sistem monitoring dan pengendalian berbasis IoT dengan penerapan metode Proportional-Integral-Derivative (PID). Sistem ini dirancang untuk memantau suhu, kelembaban, dan tekanan udara di ruang operasi, dengan kontrol otomatis pada tekanan agar tetap berada pada kondisi positif. Data pemantauan ditampilkan melalui aplikasi berbasis web sehingga dapat diakses dengan mudah tanpa keterbatasan lokasi

Dengan adanya sistem ini, diharapkan ruang operasi dapat terjaga sterilitasnya, tenaga medis lebih nyaman bekerja, serta pasien merasa aman selama tindakan operasi berlangsung. Selain itu, penelitian ini juga mendukung pemanfaatan teknologi IoT di bidang kesehatan sebagai upaya modernisasi layanan rumah sakit.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Langkah Penelitian

Untuk mempermudah dalam melakukan penelitian, dibuatlah diagram alir tahapan penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 1.

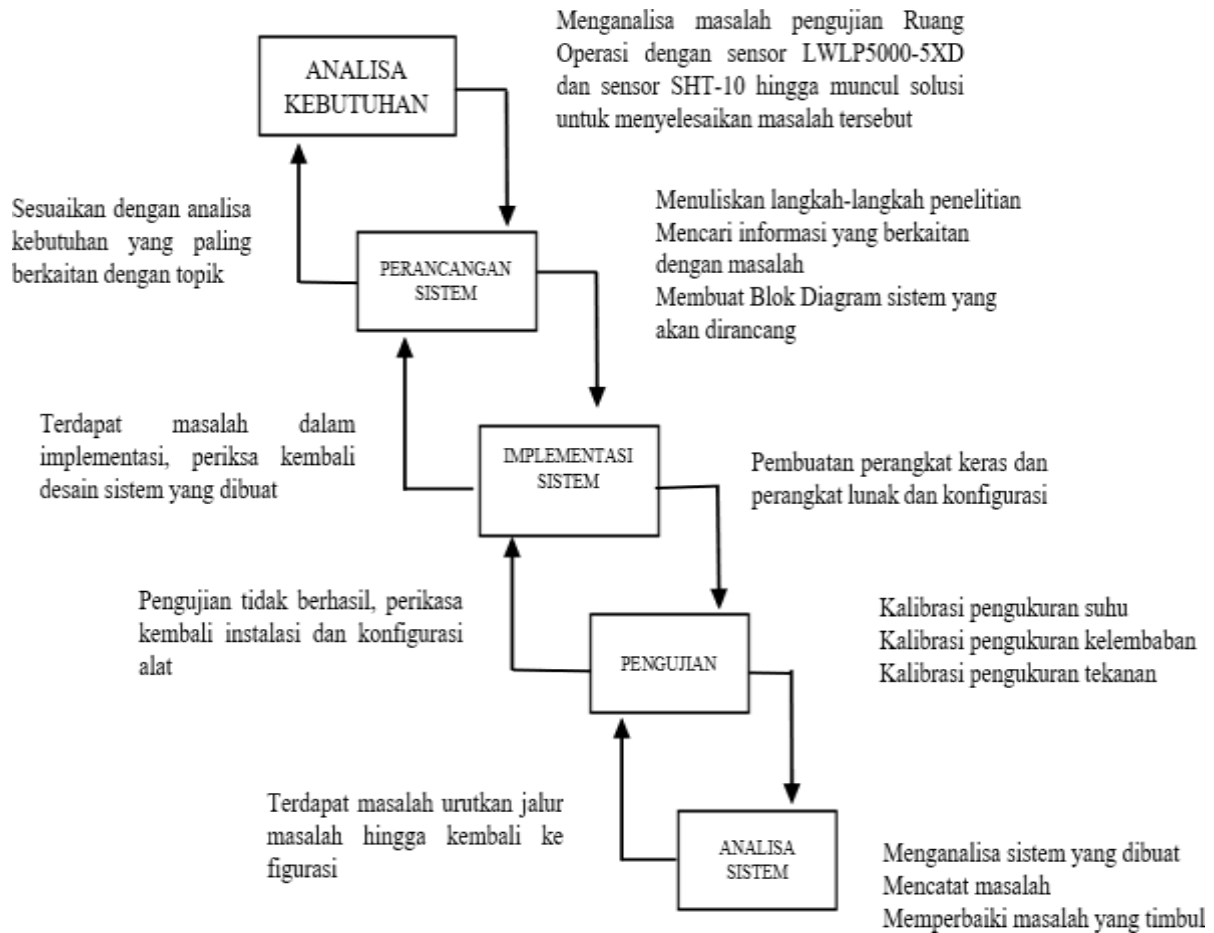


Gambar 1. Langkah Penelitian

Berdasarkan Gambar 1, penelitian ini diawali dengan penentuan spesifikasi sensor dan komponen untuk memantau suhu, kelembaban, dan tekanan udara di ruang operasi. Selanjutnya dilakukan perancangan perangkat keras untuk membuat purwarupa, kemudian diuji dan disempurnakan hingga sesuai. Setelah itu, dirancang perangkat lunak berupa antarmuka pengguna agar alat mudah digunakan, lalu diuji bersama perangkat keras untuk memastikan komunikasi dan tampilan data sensor berjalan baik.

## 2.2. Model Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian dan pengembangan (*Research and Development*) untuk menghasilkan produk alat Monitoring Udara Berbasis Internet of Things Dengan Metode *Proportional Integral Derivative* (PID) Sebagai Kendali Tekanan Pada Ruang Operasi Di Rumah Sakit Pandan Arang Kabupaten Boyolali yang akurat dan presisi. Secara garis besar jalannya penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.

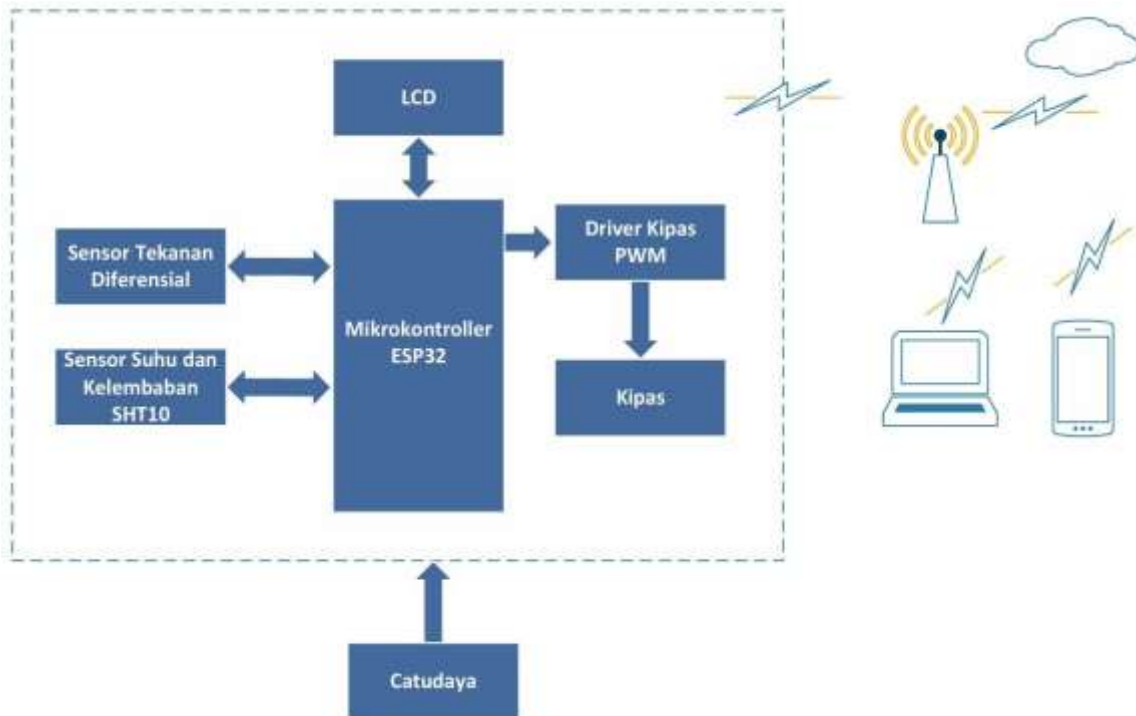


Gambar 2. Diagram Air Terjun Metode Penelitian

Tahapan penelitian dirancang dalam bentuk alur (flowchart) sebagai berikut:

1. Analisis kebutuhan: Menentukan spesifikasi sensor dan komponen (SHT-10 untuk suhu dan kelembaban, serta LWLP5000-5XD untuk tekanan udara).
2. Perancangan sistem: Membuat blok diagram perangkat keras dan perangkat lunak, termasuk integrasi sensor dengan mikrokontroler ESP32.
3. Implementasi sistem: Merakit perangkat keras, memprogram ESP32, dan menginstal sistem di ruang operasi.
4. Pengujian sistem: Kalibrasi sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran suhu, kelembaban, dan tekanan terhadap standar acuan (misalnya magnehelig meter).
5. Analisis sistem: Data hasil pengujian dianalisis untuk mengevaluasi presisi dan efektivitas kendali PID dalam menjaga kestabilan lingkungan ruang operasi.

### 2.3. Perancangan Sistem

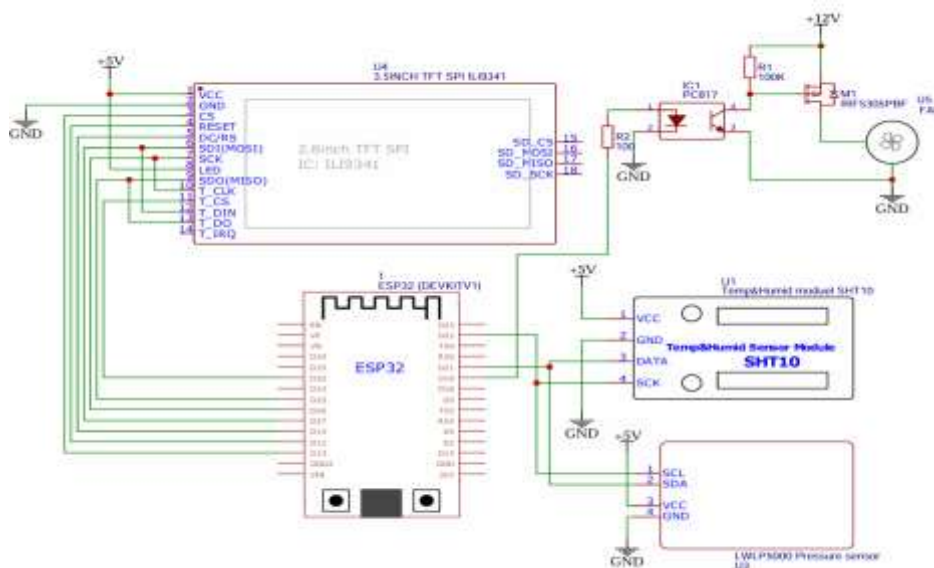


Gambar 3. Blok Diagram Sistem

Sistem menggunakan ESP32 DevKit V1 sebagai pengendali utama. Sensor suhu-kelembaban (SHT-10) dan sensor tekanan (LWLP5000-5XD) dihubungkan ke ESP32 melalui pin digital GPIO. Data hasil pembacaan ditampilkan melalui LCD TFT 2.8" serta dikirim ke perangkat pintar melalui jaringan internet. Kendali tekanan dilakukan dengan metode PID, di mana error dihitung dari selisih antara nilai setpoint dan variabel proses. Hasil perhitungan PID digunakan untuk mengatur kecepatan kipas dengan PWM (*Pulse Width Modulation*).

### 2.4. Perancangan Rangkaian Mikrokontroler

Detail dari rancangan schematic monitoring, suhu, kelembaban dan tekanan dalam rangkaian terlihat pada Gambar 4 berikut :



Gambar 4. Rancangan Schematic

Uraian dari Gambar 3.4 adalah sebagai berikut :

1. Input

Input berupa sensor yang terhubung ke ESP32, yaitu :

a. SHT10 (Sensor Suhu dan Kelembaban).

Sensor SHT10 terhubung ke GPIO D21 pada ESP32 berupa pin Data Digital.

b. LWLP5000 (Sensor Tekanan)

Sensor LWLP5000 terhubung ke GPIO D22 berupa pin SCK Digital.

2. Output

Output berupa LCD dan motor kipas yang terhubung ke ESP32, yaitu :

a. LCD TFT 2.8" (ILI9341).

LCD TFT 2.8" terhubung via output data dari ESP32 pada pin digital SPI.

b. Motor Kipas.

Motor kipas dikendalikan lewat MOSFET IRF5305 yang digerakkan oleh optocoupler PC817.

Dimana pin kendali opto PC817 terhubung ke GPIO D19 ESP32.

3. Kendali PID

Schematic monitoring, suhu, kelembaban dan tekanan yang terlihat pada gambar 3.4, PID dijalankan di software ESP32 dimana hasil perhitungannya berupa nilai kontrol (0 sampai dengan 100%). Sedangkan nilai keluaran PID melewati GPIO D19 ESP32 diteruskan untuk mengaktifkan motor kipas melalui optocoupler dan mosfet sebagai driver .

4. Pengatur Kecepatan Motor Kipas

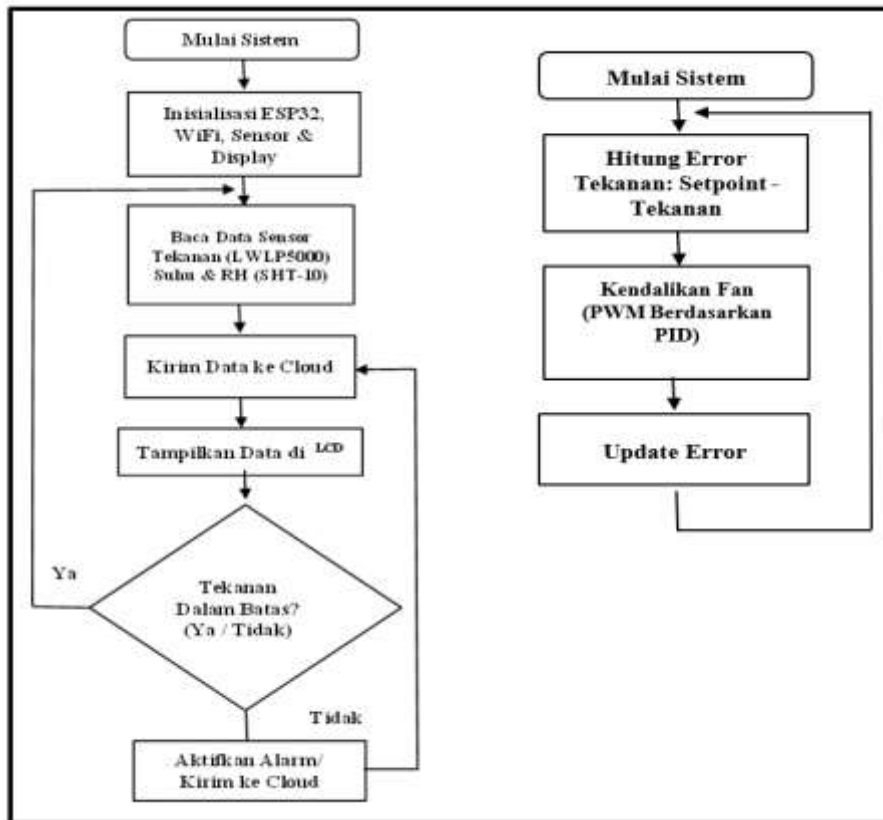
Untuk mengatur kecepatan motor kipas, maka output PID dirubah menjadi PWM pada GPIO D19. Pada saat D19 diberikan sinyal PWM, maka PC817 (optocoupler) akan ikut berdenyut, dan IRF 5305PBF akan menyalakan atau mematikan motor kipas dengan cepat sesuai duty cycle PWM. Jadi kecepatan putaran motor kipas dikendalikan oleh proporsi ON atau OFF yang dihitung oleh PID.

## **2.5. Perancangan Program Mikrokontroler**

Mikrokontroler yang digunakan pada penelitian ini yaitu ESP32 DevKit V1. Yang mempunyai kinerja processor 32-bit LX6 microprocessor dan clock frekuensi 60 MHz. Supaya mikrokontroler dapat bekerja, perlu dirancang sebuah firmware yang ditanam pada chip mikrokontroler. Firmware adalah sebuah program permanen yang ditanam pada Read Only Memory (ROM) di mikrokontroler. ROM bisa berupa EEPROM atau Flash Memory. Langkah awal yang dilakukan dalam perancangan firmware yaitu dengan membuat sebuah diagram alir dari program yang diinginkan.

Sistem kerjanya adalah: saat pertama kali sistem diberikan catu daya, maka mikrokontroler melakukan inisialisasi masukan, keluaran, dan deklarasi variabel yang digunakan, kemudian mikrokontroler menunggu data perintah yang dikirimkan oleh GUI, ketika ada perintah untuk mulai baca sensor, maka mikrokontroler akan membaca masukan dari sensor dan mengirimkan data hasil pembacaan sensor ke GUI pada LCD dan ke Smart Phone melalui web. Jika ada perintah stop, maka mikrokontroler akan menghentikan pembacaan sensor. Dan ketika menerima perintah untuk reset sistem, maka sistem akan kembali mengulangi langkah atau alir dari awal.

ESP32 memiliki arsitektur dual core yang dapat dimanfaatkan untuk multitasking menggunakan FreeRTOS (RTOS bawaan ESP-IDF atau kompatibel dengan Arduino). Ini memungkinkan menjalankan dua program (atau task) secara paralel di masing-masing core, tetapi tetap saling berhubungan melalui mekanisme sinkronisasi. Pada program pertama (Core 0), fokus pada input atau pembacaan sensor-sensor secara real time dan pengecekan batas tekanan. Sedangkan pada program kedua (core1), khusus pada penanganan output PID. Dua diagram alir ini saling berhubungan dan bertukar informasi dalam satu coding tanpa memblokir satu sama lain.



Gambar 5. Diagram Alir *Firmware*

## 2.6. Analisa Sistem

Analisa sistem dilakukan dengan cara membandingkan variasi tindakan pengukuran terhadap setting suhu dan kelembaban pada ruang operasi, sedangkan pada parameter tekanan dibandingkan dengan manometer yang telah terpasang pada ruangan operasi.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

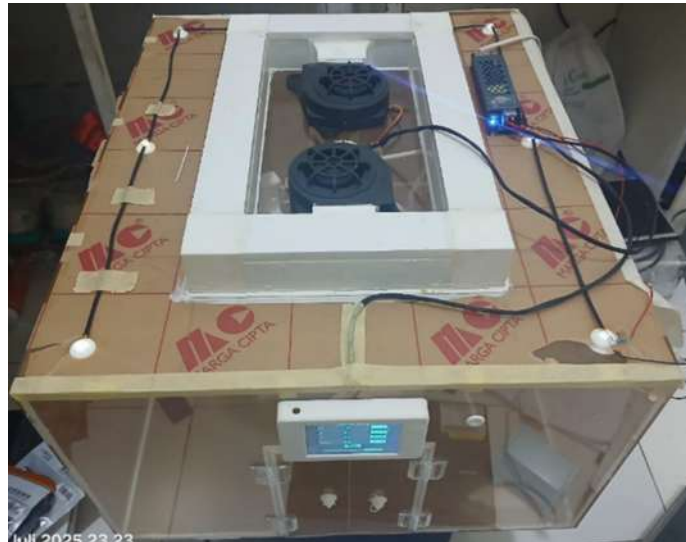
### 3.1. Hasil

#### 3.1.1. Implementasi Perangkat Keras

Miniatur ruang operasi berhasil dibuat menggunakan papan akrilik dan dilengkapi dengan komponen elektronik seperti sensor suhu, kelembaban, tekanan, motor kipas, serta modul kontrol berbasis mikrokontroler. Sensor tekanan dipasang di dalam dan luar ruangan untuk memantau perbedaan tekanan. Motor kipas dipasang di bagian atas untuk mensimulasikan aliran udara seperti pada ruang operasi sesungguhnya. Pintu miniatur dapat dibuka dan ditutup untuk menguji respons sistem terhadap gangguan.



Gambar 6. Hasil Perangkat Keras Tampak Depan



Gambar 7. Hasil Perangkat Keras Tampak Atas

### 3.1.2. Antarmuka Pengguna Grafis

Antarmuka pengguna grafis dibuat menggunakan LCD touch screen 3,5 inch pada panel depan untuk menampilkan hasil pengukuran Monitoring Ruang Operasi. Program ini juga dilengkapi dengan tampilan kondisi suhu, kelembaban dan tekanan di dalam ruangan operasi. Grafik kontrol tekanan dengan metode PID juga disajikan pada tampilan selanjutnya. Pada menu ketiga, terdapat tampilan pengaturan nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  yang berguna untuk mengatur respon PID yang paling ideal.



Gambar 8. Tampilan Kondisi Suhu, Kelembaban dan Tekanan



Gambar 9. Tampilan Grafik Kontrol Tekanan dengan PID



Gambar 10. Tampilan Pengaturan Nilai PID

### 3.1.3. Tampilan Dashboard Thinger IO

Dashboard Thinger IO digunakan untuk memvisualisasikan data secara real-time dan historis melalui antarmuka web. Fitur yang ditampilkan meliputi:

- Panel indikator utama (suhu, kelembaban, tekanan).
- Grafik tren perubahan setiap parameter.
- Navigasi untuk mengakses perangkat, data, dan pengaturan lainnya.

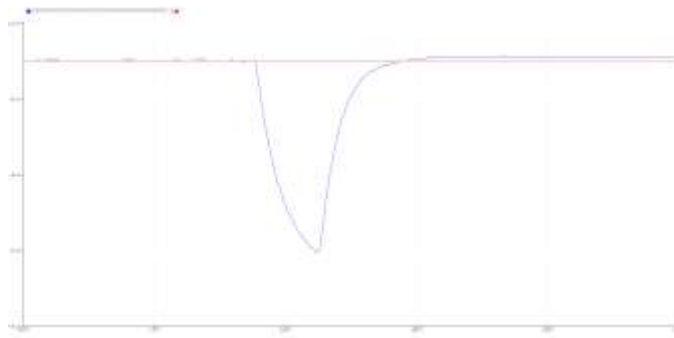
Dashboard ini memungkinkan pemantauan jarak jauh dan analisis data yang komprehensif.



Gambar 11. Tampilan Dashboard Thinger IO

### 3.1.4. Pengujian PID dan Output Kendali PID

Penentuan parameter PID ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) yang optimal sangat penting untuk kinerja sistem. Proses manual tuning dilakukan secara trial and error dengan mengamati respons sistem, karena pemodelan matematis yang akurat seringkali tidak tersedia. Langkah standarnya dimulai dengan menyetel  $K_i$  dan  $K_d$  ke nol, menaikkan  $K_p$  hingga terjadi osilasi, lalu mengurangnya menjadi setengah, dan akhirnya menaikkan  $K_i$  secara bertahap. Tujuannya adalah untuk mencapai respons yang stabil tanpa overshoot dan error yang minimal, karena tanpa parameter yang tepat, kontroler PID hanya akan bekerja secara efektif pada kondisi yang sangat spesifik.

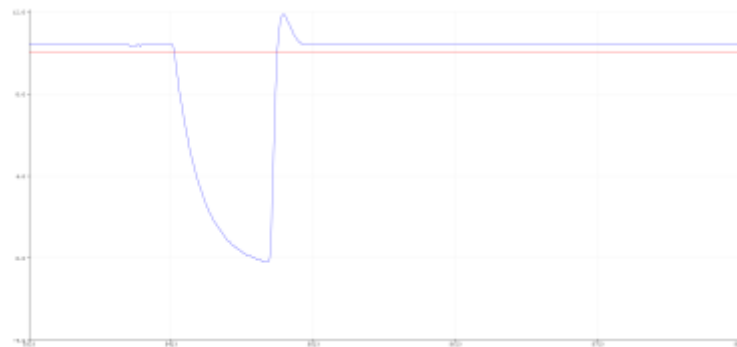


Gambar 12. Grafik Respon dengan  $KP=1$ ,  $KI=0$ , dan  $KD=0$

Dengan parameter  $KP=1$ ,  $KI=0$ ,  $KD=0$ , sistem gagal mencapai set point setelah gangguan. Tekanan turun drastis saat pintu dibuka dan hanya mampu pulih hingga 0.8–1.0 Pascal (jauh di bawah set point 10 Pascal). Hal ini terjadi karena:

- $KP=1$  terlalu lemah, menghasilkan respon lambat dan tidak mampu mengoreksi error besar.
- $KI=0$  mengakibatkan steady state error permanen, karena tidak ada aksi integral yang menghilangkan offset.
- $KD=0$  membuat sistem tidak responsif terhadap perubahan cepat, memperlambat pemulihan.

Motor kipas berfungsi, tetapi sinyal kontrol yang lemah (karena  $KP$  kecil dan  $KI=0$ ) membatasi kemampuannya untuk memulihkan tekanan ke set point.

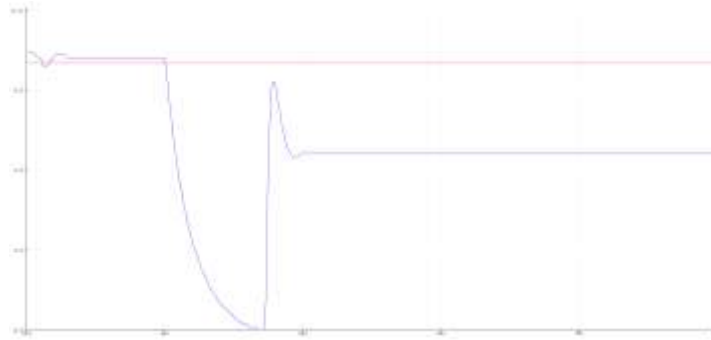


Gambar 13. Grafik Respon dengan  $KP=10$ ,  $KI=0$ , dan  $KD=0$

Dengan parameter  $KP=10$ ,  $KI=0$ ,  $KD=0$ , sistem menunjukkan peningkatan performa namun masih memiliki kelemahan. Tekanan sempat turun drastis saat pintu dibuka, lalu naik hingga mengalami overshoot ke 11-12 Pascal (melebihi set point 10 Pascal), sebelum akhirnya stabil mendekati 10 Pascal dengan offset dan fluktuasi kecil. Hal ini terjadi karena:

- $KP=10$  memberikan respon yang lebih agresif sehingga mampu mendekati set point, tetapi nilai ini masih menyebabkan overshoot.
- $KI=0$  mengakibatkan steady-state error kecil, karena tidak ada aksi integral yang menghilangkan offset secara sempurna.
- $KD=0$  membuat sistem lambat merespons perubahan cepat (saat pintu dibuka) dan tidak mampu meredam overshoot yang terjadi.

Motor kipas bereaksi dengan kuat terhadap sinyal kontrol dari  $KP=10$ , terbukti dengan kemampuannya menghasilkan tekanan di atas set point. Namun, tidak adanya aksi derivatif ( $KD$ ) menyebabkan responnya tidak teredam dan menimbulkan overshoot.

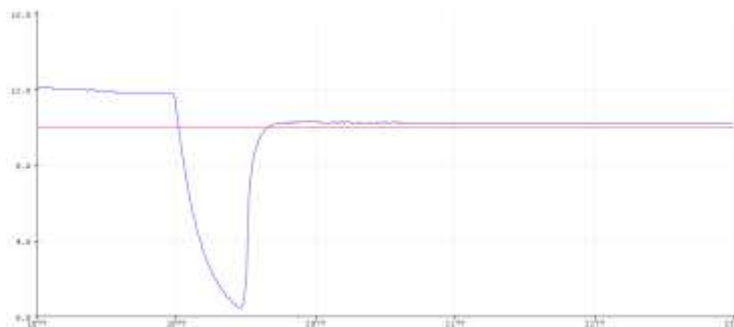


Gambar14. Grafik Respon dengan  $KP=20$ ,  $KI=0$ , dan  $KD=0$

Dengan parameter  $KP=20$ ,  $KI=0$ ,  $KD=0$ , sistem gagal mencapai set point dan mengalami steady-state error yang besar. Tekanan turun drastis hingga hampir 0 Pascal saat pintu dibuka, kemudian hanya mampu pulih dan stabil di 5-6 Pascal (jauh di bawah set point 10 Pascal). Hal ini menunjukkan:

- $KP=20$  memberikan respon yang cukup responsif, tetapi tanpa dukungan integral dan derivatif, nilai ini tidak mampu mengembalikan tekanan ke set point dan justru menyebabkan sistem stabil pada offset yang signifikan.
- $KI=0$  menjadi penyebab utama steady-state error, karena tidak ada aksi integral yang mengoreksi akumulasi error dari waktu ke waktu.
- $KD=0$  membuat sistem lambat merespons perubahan drastis saat gangguan (pintu dibuka) terjadi.

Motor kipas beroperasi pada beban maksimal dan mampu meningkatkan kecepatannya dengan cepat sebagai respons terhadap sinyal  $KP=20$ , yang dibuktikan dengan lonjakan tekanan. Namun, tanpa aksi integral ( $KI$ ), motor tidak dapat terus menyesuaikan kecepatannya untuk sepenuhnya menghilangkan error yang tersisa, sehingga tekanan akhir tetap stabil di bawah set point.

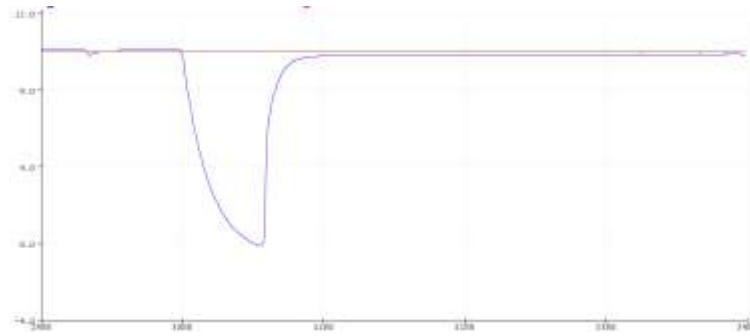


Gambar 15. Grafik Respon dengan  $KP=12$ ,  $KI=0.2$ , dan  $KD=4$

Dengan parameter  $KP=12$ ,  $KI=0.2$ ,  $KD=4$ , sistem berhasil mencapai performa yang jauh lebih baik. Tekanan sempat turun drastis di bawah 4 Pascal saat pintu dibuka, tetapi berhasil pulih dan stabil di sekitar set point 10 Pascal dengan fluktuasi minimal. Hal ini menunjukkan:

- $KP=12$  memberikan respon proporsional yang kuat, membantu sistem mendekati set point dengan cepat.
- $KI=0.2$  berhasil mengurangi steady-state error melalui koreksi akumulasi error dari waktu ke waktu.
- $KD=4$  meningkatkan stabilitas dengan meredam osilasi dan mempercepat respons terhadap perubahan cepat.

Motor kipas bereaksi dengan cepat dan efektif berkat sinyal kontrol yang kuat dari  $KP=12$  dan respons laju perubahan dari  $KD=4$ . Kemampuannya menghasilkan aliran udara yang cukup untuk mengimbangi gangguan dan menstabilkan tekanan membuktikan bahwa kombinasi parameter ini hampir optimal. Osilasi kecil yang terjadi menunjukkan sensitivitas sistem, tetapi berhasil diredam oleh aksi derivatif ( $KD$ ).

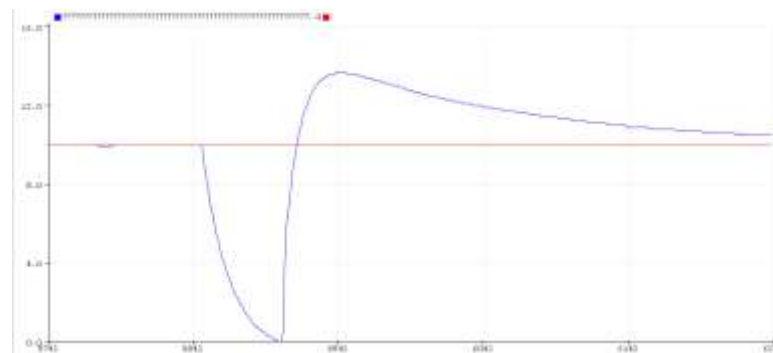


Gambar 16. Grafik Respon dengan  $KP=12$ ,  $KI=0.2$ , dan  $KD=6$

Dengan parameter  $KP=12$ ,  $KI=0.2$ ,  $KD=6$ , sistem menunjukkan performa yang optimal. Tekanan sempat turun drastis mendekati 0 Pascal saat pintu dibuka, tetapi berhasil pulih dan stabil secara sempurna di set point 10 Pascal dengan sedikit atau tanpa osilasi. Hal ini menunjukkan:

- $KP=12$  memberikan respon proporsional yang kuat untuk mendekati set point dengan cepat.
- $KI=0.2$  menghilangkan *steady-state error* melalui koreksi akumulasi error yang efektif.
- $KD=6$  meningkatkan stabilitas secara signifikan dengan meredam osilasi dan mempercepat respons terhadap perubahan cepat, menghasilkan pemulihan yang lebih halus dan terkendali dibandingkan dengan  $KD=4$ .

Motor kipas bereaksi sangat cepat dan presisi berkat sinyal kontrol yang kuat dari  $KP=12$  dan respons laju perubahan yang ditingkatkan oleh  $KD=6$ . Kemampuannya menghasilkan aliran udara yang cukup untuk mengimbangi gangguan dan menstabilkan tekanan dengan sempurna membuktikan bahwa kombinasi parameter ini hampir ideal. Tidak adanya osilasi signifikan menunjukkan bahwa aksi derivatif ( $KD$ ) berhasil meredam dinamika sistem yang sensitif, sementara aksi integral ( $KI$ ) memastikan tidak ada offset yang tersisa.

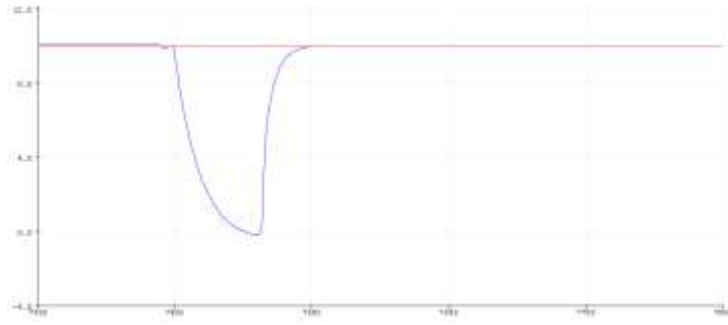


Gambar 17. Grafik Respon dengan  $KP=12$ ,  $KI=10$ , dan  $KD=10$

Dengan parameter  $KP=12$ ,  $KI=10$ ,  $KD=10$ , sistem menunjukkan respons yang terlalu agresif. Tekanan turun drastis saat pintu dibuka, lalu mengalami lonjakan overshoot yang besar hingga 12-13 Pascal (jauh di atas set point 10 Pascal), sebelum akhirnya stabil di sekitar 10 Pascal setelah beberapa osilasi kecil. Hal ini terjadi karena:

- $KI=10$  yang terlalu tinggi menyebabkan akumulasi error yang sangat agresif (integral windup), sehingga memicu overshoot dan osilasi yang signifikan.
- $KP=12$  memberikan respon proporsional yang kuat, tetapi kombinasi dengan  $KI$  yang tinggi memperburuk overshoot.
- $KD=10$  berupaya meredam osilasi, namun tidak cukup untuk mengimbangi efek destabilisasi dari  $KI$  yang terlalu besar.

Motor kipas bereaksi sangat agresif terhadap sinyal kontrol yang besar dari  $KP$  dan  $KI$ . Kemampuannya mencapai kecepatan tinggi dengan cepat justru menyebabkan tekanan melampaui set point. Meskipun  $KD=10$  membantu meredam osilasi setelah overshoot, kombinasi parameter ini tidak ideal karena menimbulkan respons yang tidak stabil dan berisiko terhadap sistem.



Gambar 18. Grafik Respon dengan  $KP=11.5$ ,  $KI=0.1$ , dan  $KD=6$

Dengan parameter  $KP=11.5$ ,  $KI=0.1$ ,  $KD=6$ , sistem menunjukkan performa yang sangat baik dan stabil. Tekanan sempat turun drastis saat pintu dibuka, tetapi berhasil pulih dan stabil sempurna di set point 10 Pascal dengan pemulihan yang halus dan hampir tanpa osilasi. Hal ini terjadi karena:

- $KP=11.5$  memberikan respon proporsional yang kuat untuk pemulihan cepat tanpa berlebihan.
- $KI=0.1$  yang kecil menghilangkan steady-state error secara perlahan tanpa menyebabkan overshoot atau osilasi.
- $KD=6$  meningkatkan stabilitas sistem dengan meredam perubahan cepat dan osilasi, menghasilkan respons yang terkendali.

Motor kipas bereaksi dengan cepat dan presisi terhadap sinyal kontrol.  $KP=11.5$  memastikan akselerasi yang memadai, sementara  $KD=6$  mencegah over-speed dan membantu menstabilkan tekanan.  $KI=0.1$  memastikan koreksi error yang halus tanpa mengganggu stabilitas.

### 3.2. Pembahasan

Hasil penelitian ini konsisten dengan teori kontrol klasik. Performa sistem kendali sangat bergantung pada pemilihan parameter PID yang tepat. Aksi Proporsional (P) menentukan kecepatan respon, aksi Integral (I) menghilangkan offset, dan aksi Derivatif (D) meredam osilasi dan meningkatkan stabilitas.

- Dynamics of the Miniature Plant:* Volume udara yang kecil dalam miniatur membuat sistem sangat sensitif terhadap perubahan, sehingga membutuhkan parameter derivatif ( $K_d$ ) yang cukup kuat untuk meredam osilasi yang muncul dari respons proporsional dan integral yang cepat.
- Effectiveness of Manual Tuning:* Metode manual tuning Ziegler-Nichols yang dimodifikasi (dengan menaikkan  $K_p$  hingga osilasi, kemudian menurunkan dan menambahkan  $K_i/K_d$ ) terbukti efektif untuk menemukan parameter sub-optimal pada sistem yang dimodelkan melalui fisiknya langsung (plant), terutama ketika model matematis yang akurat sulit didapatkan.
- System Robustness:* Konfigurasi terbaik ( $K_p \sim 12$ ,  $K_i \sim 0.1-0.2$ ,  $K_d \sim 6$ ) menunjukkan bahwa sistem yang dibangun cukup robust dalam menangani gangguan besar (bukaan pintu) dan mampu kembali ke kondisi setpoint dengan cepat dan stabil, yang merupakan kriteria utama untuk aplikasi kontrol tekanan ruang operasi.

## 4. KESIMPULAN

Sistem monitoring udara berbasis IoT telah berhasil dirancang dengan memanfaatkan sensor tekanan LWLP5000-5XD dan sensor suhu serta kelembapan SHT10 yang terintegrasi secara efisien dengan mikrokontroler ESP32. Sistem ini tidak hanya mampu membaca parameter lingkungan secara real-time tetapi juga mengirimkan data tersebut melalui jaringan WiFi ke server cloud. Dengan demikian, kondisi udara di ruang operasi dapat dipantau secara terus-menerus dan akurat dari jarak jauh, mengurangi ketergantungan pada pengawasan langsung di lokasi. Keberhasilan implementasi IoT ini menjadikan sistem sangat sesuai untuk aplikasi medis yang memerlukan presisi dan keandalan tinggi.

Dalam hal pengendalian, algoritma PID terbukti memberikan performa optimal dengan parameter yang disetel pada nilai  $K_p=11,5$ ,  $K_i=0,1$ , dan  $K_d=6$ . Konfigurasi ini menghasilkan respons sistem yang cepat terhadap gangguan, seperti perubahan tekanan akibat pintu yang terbuka tiba-tiba, dengan overshoot

minimal dan waktu pemulihan yang singkat. Selain itu, dashboard web yang dikembangkan menampilkan data dalam bentuk grafik historis, status kendali, dan notifikasi jika terjadi penyimpangan nilai, memungkinkan akses mudah melalui berbagai perangkat tanpa perlu instalasi khusus. Kombinasi antara kendali PID yang stabil dan antarmuka pemantauan yang user-friendly ini meningkatkan efektivitas pengelolaan kualitas udara di ruang operasi secara signifikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kemenkes RI, Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2019 Tentang Kesehatan Lingkungan Rumah Sakit. 2019.
- [2] Widiyono, A. Aryani, and Suryani, *Kejadian Hipotermi Berdasarkan Lama Operasi Dan Suhu Ruangan*. 2023.[Online]. Available: <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=1P3gEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=pelayanan+kesehatan+operasi+bedah+anestesi&ots=z9jFaWe2qk&sig=fC rQeSifRQ-9EvZQdwpzdN4jZZo>
- [3] “Penjelasan Sistem Tata Udara yang Tepat di Ruang Operasi Rumah Sakit - PT Farrindo Nusantara Industri.”
- [4] “Mengenal Sistem HVAC dalam MOT Ruang Operasi\_Pentingnya Ventilasi yang Baik - Hepa Filter Indonesia.”
- [5] Kemenkes RI, “Pedoman Teknis Ruang Operasi Rumah Sakit,” *Direktorat Jenderal Bina Upaya Kesehatan. Direktorat Bina Pelayanan Penunjang Med. Dan Sarana Kesehatan*, p. 70, 2012.
- [6] S. Tesis and A. Mutohar, “Prototype Alat Monitoring Kualitas Udara di Ruang Operasi Yang Terintegrasi Berbasis IOT, *Repository.Unissula.Ac.Id*, 2021, [Online]. Available: [http://repository.unissula.ac.id/22970/12/Magister\\_Teknik\\_Elektro\\_20601700003\\_fullpdf.pdf](http://repository.unissula.ac.id/22970/12/Magister_Teknik_Elektro_20601700003_fullpdf.pdf)
- [7] S. Ari Wibowo, *Kendali Tekanan Udra Berbsis Fuzzy Logic Dan Pid Pada Ruang Operasi Rumah Sakit*. 2021.
- [8] Handi, H. Fitriyah, and G. E. Setyawan, “Sistem Pemantauan Menggunakan Blynk dan Pengendalian Penyiraman Tanaman Jamur Dengan Metode Logika Fuzzy,” *J. Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 3, no. 4, pp. 3258-3265, 2021.
- [9] M. S. Nashir, W. Kartika, and S. A. Wibowo, “Pemantauan Suhu Kelembaban dan Tekanan Udara Terpusat pada Ruang Operasi Menggunakan Aplikasi Blynk,” *Med. Tek. J. Tek. Elektromedik Indones.*, vol. 3, no. 2, pp. 49-58, 2022, doi: 10.18196/mt.v3i2.12401.
- [10] D. Hidayat and I. Sari, “Monitoring Suhu dan Kelembaban Berbasis Internet of Things (IoT),” *Teknol. Dan Ilmu Komput. Prima*, vol. 4, no. 1, pp. 525-530, 2021, doi: 10.34012/jutikomp.v4i1.1676.
- [11] R. F. Maulana, M. A. Ramadhan, W. Maharani, and M. I. Maulana, “Rancang Bangun Sistem Monitoring Suhu dan Kelembapan Berbasis IOT Studi Kasus Ruang Server IT Telkom Surabaya,” *Indones. J. Multidiscip. Soc. Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 224-231, 2023, doi: 10.31004/ijmst.v1i3.169.
- [12] S. Susilawati, S. Suseno, and C. Rozikin, “Sistem Monitoring Suhu Dan Kelembaban Ruang Produksi Berbasis Wireless Sensor Network Pada Pt. Xxx Manufacturing Services Indonesia,” *JUST IT J. Sist. Informasi, Teknol. Inf. dan Komput.*, vol. 10, no. 2, p. 136, 2020, doi: 10.24853/justit.10.2.136-143.
- [13] K. W. T. Guntoro, “SMR (Smart Medical Room) Berbasis IoT (Internet of Things) Pengendali Multi-variabel Suhu dan Kelembaban Udara Secara Manual dan Otomatis Ruang Medis,” *Indones. J. Lab.*, vol. 1, no. 1, p. 33, 2023, doi: 10.22146/ijl.v1i1.81458.
- [14] P. D. Nugraha, R. Soekarta, and I. Amri, “Rancang Bangun Alat Monitoring Suhu dan Kelembaban Berbasis Internet of Things (IoT) Pada Gudang Obat Rumah Sakit Aryoko Sorong,” *Framework*, vol. 2, no. 1, pp. 21-31, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal.um-sorong.ac.id/index.php/jiki/article/download/3044/1636/12421>
- [15] R. Sephiani, “Simak 3 Contoh Penerapan IoT di Berbagai Bidang,” 2024.
- [16] Boy DI, “Kontroller PID: Prinsip Kerja, Aplikasinya dalam Pengendalian Proses, Keuntungan

Kontroller PID,” 2023.

- [17] K. Y. Maulana, “Apa Itu ESP32, Salah Satu Modul Wi-Fi Populer,” 2022.
- [18] D. Sheet, *LWLP5000*.
- [19] S. Vebrin *et al.*, “Datasheet SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15) Humidity and Temperature Sensor,” *Simetris J. Tek. Mesin, Elektro dan Ilmu Komput.*, vol. 9, no. 2, pp. 1-11, 2017.
- [20] ILITEK, “Datasheet LCD TFI,” vol. 320, no. 38.