

**MONITORING KUALITAS UDARA RUANG OPERASI
BERBASIS *INTERNET OF THINGS*
DENGAN METODE *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID)***

Tesis S-2

Untuk memenuhi persyaratan

Mencapai derajat sarjana S-2

Program Magister Teknik Elektro



Diajukan Oleh

Danang Adi Prabowo

NIM : 20602400011

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
2025**

HALAMAN PENGESAHAN TESIS
MONITORING KUALITAS UDARA RUANG OPERASI
BERBASIS *INTERNET OF THINGS*
DENGAN METODE *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID)*

Yang dipersiapkan dan disusun oleh

Danang Adi Prabowo

NIM : 20602400011

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji

Pada tanggal: 3 Desember 2025

Susunan Dewan Penguji dan Pembimbing

Pembimbing Utama


Dr. Bustanul Arifin, ST, MT

NIDN : 0614117701

Penguji 1


Prof. Dr. Sri Arttini Dwi Prasetyowati, M.Si

NIDN : 0620026501

Penguji 2


Dr. Muhammad Khosyir, ST, MT

NIDN : 0625077901

Tesis ini telah disetujui sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar

Magister Teknik

Tanggal : 3 Desember 2025

Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro


Prof. Dr. Sri Arttini Dwi Prasetyowati, M.Si

NIDN : 0620026501

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Danang Adi Prabowo
NIM : 20602400011
Program Studi : Magister Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tesis yang diajukan kepada Program Studi Magister Teknik Elektro dengan judul:

**“ Monitoring Kualitas Udara Ruang Operasi
Berbasis *Internet of Things*
Dengan Metode *Proportional Integral Derivative* (PID) “**

Merupakan karya saya sendiri dan judul ini belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA) maupun di perguruan tinggi lainnya. Karya ini juga belum pernah ditulis atau dipublikasikan oleh pihak lain, kecuali apabila secara tertulis telah dirujuk, disitasi, atau dicantumkan dalam daftar pustaka. Tesis ini sepenuhnya menjadi milik saya, dan segala bentuk kekeliruan atau kesalahan yang terdapat di dalamnya menjadi tanggung jawab saya pribadi.

Semarang, 3 Desember 2025

Penulis



Danang Adi Prabowo

NIM 20602400011

PERNYATAAN PERSETUJUAN UNGGAH KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Danang Adi Prabowo
NIM : 20602400011
Program Studi : Magister Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tesis dengan judul:

**“ Monitoring Kualitas Udara Ruang Operasi
Berbasis *Internet of Things*
Dengan Metode *Proportional Integral Derivative* (PID) “**

Dan menyetujuinya menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan dipublikasikan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/ plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung

Semarang, 3 Desember 2025

Penulis



Danang Adi Prabowo

NIM 20602400011

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, shalawat dan salam kepada Rasulullah SAW yang telah menjadi suri tauladan bagi kita semua. Sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul Monitoring Udara Berbasis Monitoring Kualitas Udara Ruang Operasi Berbasis Internet of Things Dengan Metode Proportional Integral Derivative (PID) dengan baik.

Pada kesempatan kali ini, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada :

1. Prof. Dr. Sri Arttini Dwi Prasetyowati, M.Si selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang
2. Bapak Dr. Bustanul Arifin, ST,MT selaku Pembimbing Utama yang telah meluangkan waktu dan memberikan banyak saran, masukan serta kemudahan kepada penulis.
3. Para Dosen dan civitas akademika Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Kedua orang tua dan semua anggota keluarga besar tercinta.
5. Istri dan anak-anak tercinta yang banyak memberi semangat.
6. Bapak Ricky Maulana Firdaus dan bapak Taufik yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
7. Rekan-rekan mahasiswa Magister Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung seperjuangan.

Akhir kata penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu, semoga tesis ini bermanfaat untuk ilmu pengetahuan khususnya bagi Program Studi Magister Teknik Elektro dan masyarakat pada umumnya dan semoga Allah SWT selalu melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada kita semua, Aamiin.

Semarang, 3 Desember 2025

Danang Adi Prabowo

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR PERSAMAAN	x
INTISARI	xi
ABSTRACT	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Keaslian Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Tinjauan Pustaka	8
2.2 Landasan Teori	12
2.2.1 Ruang Operasi	12
2.2.2 Internet Of Things	14
2.2.3 Proportional Integral Derivative (PID)	16
2.2.4 ESP32	18
2.2.5 LWLP5000-5XD	20
2.2.6 SHT-10	22
2.2.7 LCD (Liquid Crystal Display) TFT SPI	23
2.2.8 Motor Kipas.....	24
2.2.9 Kalibrasi	25
BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1 Langkah Langkah Penelitian.....	28
3.2 Model Penelitian	29
3.3 Perancangan Sistem.....	30
3.4 Perancangan Rangkaian Mikrokontroler.....	31
3.5 Perancangan Program Mikrokontroler.....	33
3.6 Analisa Sistem	36
3.7 Tempat dan Waktu Penelitian.....	36

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Hasil Rancangan Perangkat Keras	39
4.2 Hasil Rancangan Antarmuka Pengguna Grafis	40
4.3 Tampilan Dashboard Thinger IO	42
4.4 Kalibrasi Sensor-Sensor	44
4.5 Pengujian PID dan Output Kendali PID	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA	58

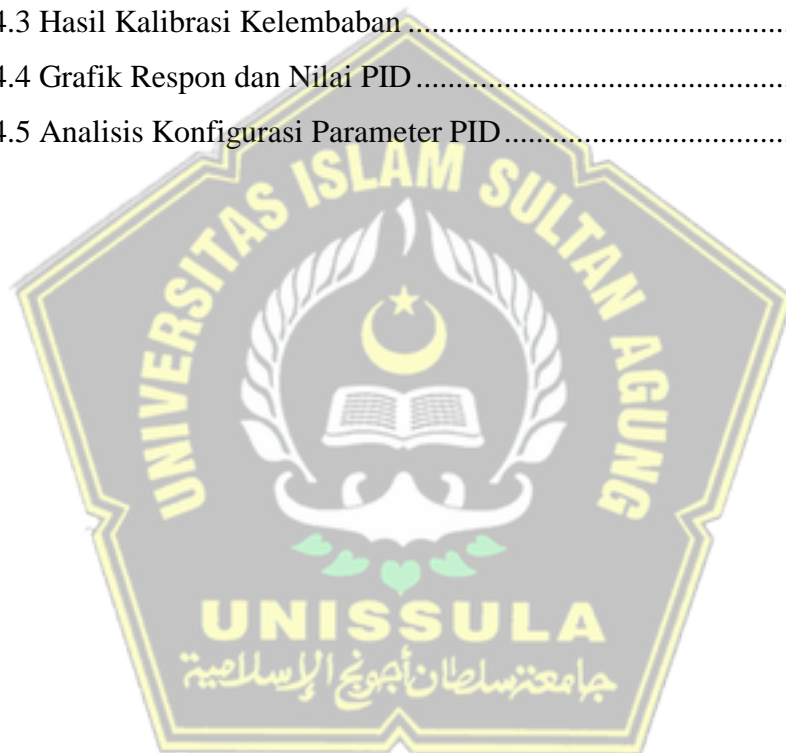


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 ESP 32	18
Gambar 2.2 LWLP5000-5XD	20
Gambar 2.3 Sensor SHT10.....	22
Gambar 2.4 Diskripsi Pin SHT10.....	23
Gambar 2.5 Tampilan Fisik LCD SPI	24
Gambar 2.6 Tampilan Fisik Motor Kipas	25
Gambar 2.7 Magnehelig	27
Gambar 2.8 Thermohygrometer.....	27
Gambar 3.1 Diagram Air Terjun Metode Penelitian	29
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem	30
Gambar 3.3 Rancangan Schematic	32
Gambar 3.4 Diagram Alir Firmware (Core 0)	34
Gambar 3.5 Diagram Alir Firmware (Core 1)	35
Gambar 3.6 Ruang Tindakan Operasi di Rumah Sakit Pandan Arang Boyolali Tampak Depan	37
Gambar 3.7 Ruang Tindakan Operasi di Rumah Sakit Pandan Arang Boyolali Tampak Dalam.....	38
Gambar 4.1 Hasil Perangkat Keras Tampak Depan.....	39
Gambar 4.2 Hasil Perangkat Keras Tampak Atas.....	40
Gambar 4.3 Tampilan Kondisi Suhu, Kelembaban dan Tekanan.....	41
Gambar 4.4 Tampilan Grafik Kontrol Tekanan dengan PID	41
Gambar 4.5 Tampilan Pengaturan Nilai PID	42
Gambar 4.6 Tampilan Dashboard Thinger IO	42
Gambar 4.7 Grafik Kalibrasi Tekanan	47
Gambar 4.8 Hasil Kalibrasi Suhu.....	48
Gambar 4.9 Hasil Kalibrasi Kelembaban.....	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Indeks Angka Kuman.....	13
Tabel 2.2 Standar Baku Mutu Laju Ventilasi	13
Tabel 2.3 Standar Baku Mutu Suhu dan Kelembaban.....	13
Tabel 3.1 Rencana Penelitian.....	38
Tabel 4.1 Hasil Kalibrasi Tekanan.....	45
Tabel 4.2 Hasil Kalibrasi Suhu	46
Tabel 4.3 Hasil Kalibrasi Kelembaban	47
Tabel 4.4 Grafik Respon dan Nilai PID	51
Tabel 4.5 Analisis Konfigurasi Parameter PID.....	53



DAFTAR PERSAMAAN

(2.1) Keluaran Kontrol PID.....	17
(2.2) Keluaran Tekanan.....	21
(2.3) Persentase Error.....	26
(2.4) Persentase Akurasi	26



INTISARI

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.

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. Proses pengendalian tekanan dilakukan dengan menghitung selisih nilai tekanan terhadap *setpoint*, kemudian algoritma PID bekerja melakukan koreksi secara proporsional, integral, dan derivatif untuk menghasilkan sinyal kendali yang dikirimkan ke aktuator sehingga tekanan udara tetap stabil. 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.

The system is designed using an ESP32 microcontroller as the main processing unit, an SHT-10 sensor for measuring temperature and humidity, an LWLP5000-5XD sensor for air pressure measurement, and an actuator to maintain pressure stability. The pressure control process operates by calculating the deviation between the measured value and the defined setpoint, after which the PID algorithm generates corrective actions through proportional, integral, and derivative responses. The processed data are displayed through a web-based application that can be accessed in real time 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.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 7 Tahun 2019 tentang Kesehatan Lingkungan Rumah Sakit, suhu ruang operasi yang disarankan berada pada kisaran 22°C hingga 27°C, dengan tingkat kelembaban 40–60% RH serta tekanan udara yang lebih positif dibandingkan area di luar ruangan. Ketentuan ini bertujuan untuk mencegah pertumbuhan mikroorganisme seperti kuman, bakteri, virus, maupun jamur sehingga sterilitas ruang operasi tetap terjaga. Selain itu, untuk memastikan kenyamanan bagi tenaga medis atau pengguna yang bekerja di dalam ruang operasi, maka diperlukan sebuah perangkat pemantau [1].

Masalah yang akan terjadi apabila suhu dan kelembaban pada ruang operasi adalah resiko hipotermia pada pasien [2], kelelahan dan dehidrasi bagi tenaga medis, meningkatnya resiko pertumbuhan jamur dan bakteri serta meningkatnya listrik statis. Sedangkan masalah yang akan terjadi apabila tekanan udara pada ruang operasi tidak ideal adalah udara dari luar akan dapat masuk dan membawa partikel debu dan mikroorganisme, tenaga medis juga akan tidak nyaman serta stabilitas peralatan medis yang sensitif akan terganggu [3]. Pemecahan masalah berkaitan dengan suhu dan kelembaban adalah dengan melakukan pengontrolan suhu, kelembaban dan tekanan dengan cara pemasangan HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) yang sesuai standar untuk ruang operasi serta dapat pula dengan pemasangan sensor suhu otomatis untuk memantau suhu dan kelembaban secara *real time* [4]. Sedangkan pemecahan masalah berkaitan dengan tekanan udara yang tidak ideal adalah dengan cara pemasangan ventilasi khusus dengan filtrasi HEPA (*High-Efficiency Particulate Air*) dan pemasangan sistem kendali tekanan udara serta rutin melakukan pemantauan dan pemeriksaan sistem aliran udara.

Pemantauan merupakan proses pengumpulan dan analisis data. Dalam konteks ini, pemantauan dilakukan terhadap ruangan dengan parameter suhu, kelembaban, dan tekanan udara. Tujuan dari pemantauan tersebut adalah untuk mengetahui kondisi aktual dari ruangan yang diamati. Hal ini menjadi sangat penting khususnya pada ruang operasi yang terbagi menjadi lima zona dengan tingkat risiko rendah, sedang, hingga tinggi. Zona 1 hingga zona 3 digolongkan sebagai area berisiko rendah karena ketiga zona tersebut berada pada jarak yang relatif jauh dari meja operasi atau lokasi utama tindakan pembedahan. [5].

Aplikasi berbasis web, atau *web-based application*, adalah aplikasi yang dapat diakses melalui browser web tanpa perlu dilakukan instalasi di perangkat pengguna. Program aplikasi disimpan di web server dan ditampilkan dalam bentuk situs web. Aplikasi ini dapat digunakan untuk *interface* pemantauan suhu, kelembaban dan tekanan udara pada suatu ruangan. Aplikasi berbasis web memiliki beberapa keunggulan, diantaranya : mudah diakses, tidak perlu instalasi, tidak perlu lisensi, fleksibilitas sistem operasi, biaya lebih murah, dapat diakses dari berbagai perangkat, seperti komputer, laptop, tablet atau smartphone, pembaruan aplikasi dilakukan secara terpusat di server. Pemanfaatan teknologi jaringan internet memungkinkan proses pemantauan dilakukan dengan lebih efisien. Dengan adanya sistem berbasis internet, tenaga medis atau pengguna dapat dengan mudah melihat dan memantau kondisi suatu ruangan secara praktis dan cepat. Kendali PID (*Proportional Integral Derivative*) berguna untuk mengatur tekanan udara agar tetap stabil sesuai nilai yang ditetapkan. Penggunaan PID dapat dipilih karena metode ini mampu memberikan respon yang cepat, akurat, dan stabil terhadap perubahan kondisi di dalam ruangan. Komponen *Proportional* merespon perubahan *error* secara langsung, *Integral* menghilangkan *error* jangka panjang yang tidak terselesaikan, dan *Derivative* membantu meredam perubahan tekanan yang terlalu cepat. Dengan kombinasi ketiganya, PID mampu menjaga tekanan ruangan tetap berada pada batas aman serta meminimalkan fluktuasi, sehingga kualitas lingkungan ruangan, terutama ruang operasi, dapat terjaga dengan baik.

Sebelumnya telah dibuat penelitian dengan judul *Prototype Alat Monitoring Kualitas Udara di Ruang Operasi Yang Terintegrasi Berbasis IOT* [6]. Di rumah sakit sering muncul kendala dalam proses monitoring kualitas udara di ruang operasi, karena pemantauan belum dapat dilakukan secara kontinu maupun dari jarak jauh. Hal ini terjadi karena peralatan yang digunakan untuk mengukur suhu, kelembaban, kebersihan, dan tekanan udara masih belum terhubung dalam satu sistem online yang terintegrasi. Akibatnya, setiap parameter harus dipantau secara terpisah, sehingga kurang efisien dari segi waktu, fungsi, maupun biaya. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah inovasi untuk meningkatkan keandalan serta kinerja setiap komponen melalui model monitoring yang terintegrasi dengan jaringan internet. Penelitian ini menghasilkan alat pemantau kualitas udara ruang operasi yang terintegrasi dan berbasis *Internet of Things*. Seluruh sensor digabungkan dan dikendalikan oleh satu mikrokontroler, dengan keluaran yang dibagi menjadi dua, yaitu tampilan lokal melalui display dan pengiriman data ke *cloud* berbasis IoT. Platform *Thingspeak* digunakan untuk menampilkan data hasil pengukuran serta analisis yang menunjukkan bahwa seluruh komponen yang terintegrasi berfungsi dengan baik.

Selanjutnya telah dilakukan penelitian dengan judul *Kendali Tekanan Udara Berbasis Fuzzy Logic dan PID Pada Ruang Operasi Rumah Sakit* [7]. Dalam tulisan tersebut dijelaskan bahwa rumah sakit merupakan bangunan yang memiliki banyak potensi sumber penyakit dan infeksi. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengawasan dan pengendalian yang tepat untuk mencegah penyebaran infeksi melalui udara. Salah satu aspek penting yang harus diperhatikan adalah penerapan sistem tata udara yang benar, terutama pada ruangan khusus seperti ruang operasi, di mana tekanan udara harus selalu dijaga tetap positif dan stabil. Tulisan ini mengembangkan dua pendekatan sistem pengendalian, yaitu menggunakan pengendali logika Fuzzy dan pengendali PID. Sistem ini didukung oleh sensor tekanan MPS20N0040D-D, mikrokontroler, serta LCD karakter 20x4 sebagai media tampilan. Motor DC berfungsi sebagai penggerak blower dan exhaust untuk menjaga kondisi tekanan udara sesuai yang diinginkan.

Berdasarkan pengamatan terhadap dua jenis kontrol yang diterapkan memiliki karakter yang berbeda dimana respon sistem logika fuzzy lebih kasar dibandingkan dengan kontrol PID. Dari segi akurasi PID membutuhkan proses isolasi sebelum mencapai titik stabil, sedangkan kontrol fuzzy lebih tepat untuk mencapai titik stabil pada 10 pascal. Dengan nilai $P = 2$, $I = 5$, $D = 1$, respon untuk mencapai nilai yang ditetapkan 10 pascal dari titik awal membutuhkan waktu 3,29 detik.

Sebelumnya telah dibuat sebuah sistem pemantauan berjudul “Sistem Pemantauan Menggunakan Blynk dan Pengendalian Penyiraman Tanaman Jamur dengan Metode Logika Fuzzy”[8], Sistem tersebut memanfaatkan aplikasi Blynk yang memiliki keunggulan dalam hal pengiriman data dan kontrol jarak jauh selama perangkat terhubung dengan Internet. Namun, kekurangan dari sistem tersebut adalah pemantauannya tidak dirancang untuk ruangan dengan tingkat sterilitas tinggi.

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, penulis merancang alat yang mampu menutupi kekurangan tersebut, yaitu sistem pemantauan terpusat untuk suhu, kelembaban, dan tekanan udara pada ruang operasi dengan menggunakan aplikasi berbasis web. Khususnya pada pengaturan tekanan udara yang seringkali membawa efek yang tidak baik pada lingkungan ruang operasi apabila terjadi infeksi silang dari dalam ruang operasi dan dari koridor ruang operasi. Diharapkan dengan dirancangnya alat ini dapat membantu tenaga medis dalam melakukan pemantauan ruangan operasi tanpa harus datang langsung ke ruangan operasi serta dapat diketahui kondisi kamar operasi tersebut telah sesuai dengan yang telah dipersyaratkan atau tidak.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, perumusan masalah yang akan dijadikan bahan penelitian adalah bagaimana merancang sistem monitoring udara berbasis IoT di ruang operasi, bagaimana penerapan metode PID untuk mengendalikan tekanan udara dan bagaimana tampilan data bisa diakses melalui aplikasi berbasis web?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini meliputi :

1. Membuat sistem hardware Monitoring Kualitas Udara Ruang Operasi Berbasis *Internet of Things* Dengan Metode *Proportional Integral Derivative* (PID) menggunakan ESP32 sebagai pemroses sinyal dari sensor sensor yang digunakan.
2. Membuat sistem Monitoring Kualitas Udara Ruang Operasi Berbasis *Internet of Things* Dengan Metode *Proportional Integral Derivative* (PID) berbasis web.
3. Parameter yang dipantau meliputi suhu, kelembaban dan tekanan udara.
4. Parameter yang dikendalikan adalah tekanan udara.
5. Penelitian ini tidak membahas detail kecepatan putaran kipas, namun hanya fokus pada hasil keluaran PID berupa sinyal kontrol untuk menjaga kestabilan tekanan udara.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan *prototype* berupa perangkat keras dan perangkat lunak Monitoring Kualitas Udara Ruang Operasi Berbasis *Internet of Things* Dengan Metode *Proportional Integral Derivative* (PID) sehingga mendapatkan pengukuran yang akurat.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Membantu memudahkan para teknisi dalam melakukan pemantauan suhu, kelembaban dan tekanan udara di ruang operasi dalam rangka mencegah pertumbuhan kuman, bakteri, virus maupun jamur sehingga ruangan operasi tetap terjaga kesterilannya.
2. Dengan suhu, kelembaban dan tekanan udara yang terpantau dan

terkontrol dapat membuat staf bedah dan tim medis lebih nyaman dan aman saat mengenakan pakaian pelindung yang tebal. Pasien yang nyaman juga cenderung pulih lebih cepat.

3. Dengan terkontrolnya tekanan udara di ruang operasi dalam kondisi positif, maka akan dapat mencegah masuknya udara dari luar yang mungkin mengandung debu, bakteri atau virus.

1.6 Keaslian Penelitian

Penelitian ini bermaksud ikut pengembangan dan memanfaatkan teknologi berbasis *Internet Of Things*, serta penggunaan aplikasi berbasis web. Keunggulan aplikasi berbasis web adalah mudah diakses, tidak perlu instalasi, tidak perlu lisensi, fleksibilitas sistem operasi, biaya lebih murah, dapat diakses dari berbagai perangkat, seperti komputer, laptop, tablet atau smartphone, pembaruan aplikasi dilakukan secara terpusat di server. Alat yang dirancang ini memiliki manfaat sebagai reaksi cepat guna memeriksa kondisi udara apabila terjadi masalah yang berkaitan dengan suhu, kelembaban dan tekanan udara. Perancangan alat ini menggunakan beberapa komponen yaitu ESP32 sebagai mikrokontroler, LWLP5000-5XD sebagai sensor tekanan udara serta SHT-10 sebagai sensor suhu dan kelembaban dan LCD TFT SPI sebagai media untuk menampilkan data. Penggunaan metode PID dan aktuator sebagai pengatur tekanan udara berfungsi untuk mempertahankan tekanan ideal dalam upaya menjaga kestabilan sistem ventilasi dan mencegah infeksi silang yang dimungkinkan terjadi pada ruang operasi di Rumah Sakit Pandan Arang Kabupaten Boyolali.

Beberapa penelitian yang pernah dilakukan oleh peneliti lain berkaitan dengan monitoring suhu, kelembaban dan tekanan udara berbasis *Internet Of Things* antara lain adalah Pemantauan Suhu Kelembaban dan Tekanan Udara Terpusat Pada Ruang Operasi Menggunakan Aplikasi Blynk [9]. Perancangan alat ini menggunakan beberapa komponen inti yaitu sensor DHT11, sensor BMP280 dan NodeMCU ESP8266, ESP-01 serta Arduino Mega yang akan terhubung dengan wifi. Hasil pengukuran dari tiap-tiap sensor ditampilkan ke

sebuah aplikasi *smartphone*. Aplikasi yang telah diprogramkan dan aplikasi tersebut dapat dibuka menggunakan aplikasi. Aplikasi Blynk yang telah tersedia di *Smartphone*, serta dapat ditampilkan pada layar LCD.

Terdapat penelitian lain yang berkaitan dengan penggunaan sistem Internet of Things (IoT) [10]. Dengan memanfaatkan teknologi IoT, dilakukan penelitian berjudul Monitoring Suhu dan Kelembaban Berbasis IoT yang secara khusus menggunakan NodeMCU ESP8266 sebagai mikrokontroler serta aplikasi Blynk sebagai platform pemantauan. Sistem ini dilengkapi dengan sensor DHT11 untuk mengukur suhu dan kelembaban. Selain itu, sistem terhubung dengan *buzzer* yang berfungsi sebagai alarm apabila suhu melebihi batas yang telah ditentukan, yaitu 40°C. Ketika batas tersebut terlampaui, *buzzer* akan aktif berbunyi dan data suhu yang terukur akan ditampilkan pada *smartphone* pengguna.

Penggunaan *Web Base* sebagai aplikasi dalam memonitor suhu dan kelembaban ruang juga pernah dilakukan oleh peneliti lainnya yaitu Perangkat Monitoring Suhu dan Kelembaban di Dalam Ruang Server [11]. Penelitian tersebut memanfaatkan ESP32 sebagai mikrokontroler, sensor DHT22 untuk mengukur suhu, serta LCD I2C sebagai media tampilan data. Sistem ini juga menggunakan Telegram sebagai sarana notifikasi ke *smartphone*, dan Thinger.io sebagai platform untuk memvisualisasikan serta merekam data hasil pembacaan sensor. Data tersebut dapat disajikan dalam bentuk nilai numerik maupun grafik yang menggambarkan perubahan suhu dan kelembaban dari waktu ke waktu. Alat ini bermanfaat karena menghilangkan kebutuhan untuk memeriksa kondisi ruang server secara langsung. Selain itu, proses pengecekan suhu menjadi lebih praktis dengan adanya situs web yang menyediakan informasi suhu ruangan secara *real time*. dan mendapatkan notifikasi jika terjadi suatu kondisi suhu dan kelembaban diluar ambang batas yang telah ditetapkan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian yang berhubungan dengan Judul Monitoring Kualitas Udara Ruang Operasi Berbasis *Internet of Things* Dengan Metode *Proportional Integral Derivative* (PID) antara lain adalah :

- a. Pada penelitian Muhammad Sulthon Nashir, Wisnu Kartika, Susilo Ari Wibowo [9], telah dirancang sebuah alat untuk memantau suhu, kelembaban, dan tekanan udara pada ruangan yang menjadi objek pengamatan. Untuk mempermudah proses pemantauan di ruang operasi, dikembangkan sebuah sistem Pemantauan Suhu, Kelembaban, dan Tekanan Udara Terpusat Menggunakan Aplikasi Blynk. Perancangan alat ini memanfaatkan beberapa komponen utama, yaitu sensor DHT11, sensor BMP280, NodeMCU ESP8266, dan Arduino Mega yang terhubung melalui jaringan WiFi. Hasil pembacaan dari masing-masing sensor ditampilkan melalui aplikasi pada *smartphone* yang telah diprogram menggunakan platform Blynk, serta dapat dilihat pula melalui layar LCD yang terpasang pada sistem.
- b. Penelitian Dody Hidayat, Ika Sari [10], tentang pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) dengan konektivitas internet yang tersambung secara terus menerus. Dengan memanfaatkan teknologi IoT. Penelitian yang dilakukan yaitu Monitoring Suhu dan Kelembaban Berbasis IoT ini secara spesifik menggunakan perangkat NodeMCU ESP8266 sebagai microntroller dan aplikasi pendukung Blynk sebagai alat monitoring. Sistem terdiri dari sensor DHT11 yang digunakan sebagai sensor pengukur suhu dan kelembaban. Sistem ini juga terhubung dengan *Buzzer* dimana fungsi dari *Buzzer* tersebut adalah sebagai output Alarm jika terjadi perubahan suhu yang tinggi dengan melampaui batas yang sudah ditetapkan sebesar 40oC maka *Buzzer* akan aktif berbunyi serta akan menampilkan hasil pengukuran suhu pada *smartphone*.

- c. Penelitian selanjutnya Rizky Fenaldo Maulana, Muhammad Akbar Ramadhan, Wiranti Maharani, Muhamad Iqbal Maulana [11], tentang Rancang Bangun Perangkat Monitoring Suhu dan Kelembaban di Dalam Ruang Server. Pendekatan ini menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler, sensor DHT22 untuk mengukur suhu, serta LCD I2C sebagai media tampilan data. Sistem juga dilengkapi dengan Telegram sebagai sarana notifikasi pada smartphone dan Thinger.io sebagai platform yang memvisualisasikan serta merekam data hasil pembacaan sensor dalam bentuk nilai numerik maupun grafik yang menunjukkan perubahan suhu dan kelembaban dari waktu ke waktu. Alat ini bermanfaat karena mengurangi kebutuhan untuk datang langsung ke ruang server guna memeriksa kondisi suhu dan kelembaban. Selain itu, pemantauan menjadi lebih praktis berkat adanya situs web yang menyajikan informasi secara *real time*, serta notifikasi otomatis ketika suhu atau kelembaban berada di luar batas yang telah ditentukan.
- d. Penelitian Susilawati, Suseno, dan Chaerur Rozikin [12], yang bertujuan membuat sebuah Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban Ruang Produksi Komponen Semikonduktor. Penelitian ini memiliki beberapa tahapan yaitu pengumpulan data, identifikasi kebutuhan, perancangan sistem, instalasi *software* dan *hardware*, dan pengujian sistem. Sistem yang dibuat dalam penelitian ini mengimplementasikan teknologi IoT (*internet of things*) sebagai penghubung antara node sensor dan node monitor dengan menggunakan protokol HTTP. Sistem ini menggunakan sensor DHT22 dan microcontroller Nodemcu v.3 yang tertanam modul wifi esp8266 sebagai pengirim data melalui jaringan internet ke sebuah server. Berdasarkan hasil pengujian, node sensor berhasil mengirimkan data ke node monitor (server) secara kontinu dengan interval 1 menit dengan akurasi suhu 96,2% ,akurasi kelembaban 90,0% dan berhasil mengirimkan notifikasi peringatan ketika terjadi kondisi abnormal.
- e. Penelitian Kasto Wijoyo Teguh Guntoro [13], berkaitan dengan pemanfaatan IoT dengan menggunakan protokol MQTT (*Message*

Queuing Telemetry Transport). Sistem cerdas pengendali otomatis tersebut menggunakan FLC (*Fuzzy Logic Control*), FAC (*Fuzzy Adaptive Control*), dan Kontrol MIMO (*Multi Input Multi Output*) yang terintegrasi menjadi satu. SMR (*Smart Medical Room*) adalah sistem kendali cerdas berbasis IoT untuk mengendalikan suhu dan kelembaban udara ruang medis. Sistem kendali otomatis ini berfungsi membantu operator dalam memantau serta menjaga suhu dan kelembaban udara agar tetap sesuai dengan standar baku mutu kualitas udara pada ruangan medis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses pemantauan dan pengendalian kondisi ruangan dapat dilakukan baik secara manual oleh operator maupun secara otomatis. Rata-rata hasil pengukuran suhu dan kelembaban pada ruang ICU adalah 23,39°C dan 54,72%. Pada ruang UGD diperoleh nilai rata-rata 21,87°C dan 49,76%. Sementara itu, ruang operasi menunjukkan rata-rata suhu 24,16°C dan kelembaban 52,7%, dan ruang bersalin memiliki rata-rata 24,52°C dan 57,13%. Pengendalian suhu dan kelembaban secara otomatis menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai nilai yang memenuhi standar baku mutu ruangan medis. Penelitian ini bertujuan merancang sistem kendali manual dan otomatis berbasis kecerdasan buatan dengan pendekatan sistem kendali multivariabel pada ruang medis berbasis IoT, sehingga diperoleh kondisi suhu dan kelembaban udara yang sesuai standar.

- f. Penelitian Pandu Diaz Nugraha, Rendra Soekarta, Irman Amri [14], dengan Sistem Pemantauan Suhu Berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan NodeMCU ESP8266 dengan sensor DHT22. Penelitian ini bertujuan untuk memantau suhu apotek secara *real time* serta memberikan akses data suhu melalui perangkat *mobile* menggunakan platform Blynk. Pengujian dilakukan dengan merancang dan mengimplementasikan perangkat keras, yaitu ESP8266 NodeMCU sebagai mikrokontroler dan sensor DHT22 sebagai pengukur suhu. NodeMCU ESP8266 diprogram untuk secara berkala mengambil data dari sensor DHT22 dan mengirimkannya ke *platform cloud Thingspeak* untuk disimpan. *Thingspeak* dipilih karena mampu menyediakan

layanan penyimpanan data dan visualisasi grafik untuk mempermudah proses observasi. Dengan demikian, penelitian ini menawarkan solusi praktis dalam pemantauan suhu di apotek RS Aryoko Korem. Pemanfaatan ESP8266 NodeMCU, sensor DHT22, serta integrasi Thingspeak dan Blynk meningkatkan efisiensi pemantauan dan membantu menjaga kualitas obat yang disimpan di lingkungan apotek yang sensitif terhadap suhu.

- g. Penelitian Ahkmad Mutohar [6], yang menghasilkan sebuah alat yang mampu memonitor kualitas udara di ruang operasi secara terintegrasi berbasis *Internet of Things*. Semua sensor digabungkan dan dikendalikan dalam satu mikrokontroler, output dari hasil integrasi dibagi menjadi dua yaitu *display* dan *cloud* berbasis IoT. Aplikasi *Thingspeak* menampilkan hasil pengukuran dan analisis yang menunjukkan performa semua komponen yang terintegrasi berfungsi dengan baik.

Penelitian yang peneliti kembangkan, memanfaatkan teknologi berbasis *Internet Of Things*, serta penggunaan aplikasi berbasis web. Keunggulan aplikasi berbasis web adalah mudah diakses, tidak perlu instalasi, tidak perlu lisensi, fleksibilitas sistem operasi, biaya lebih murah, dapat diakses dari berbagai perangkat, seperti komputer, laptop, tablet atau smartphone, pembaruan aplikasi dilakukan secara terpusat di server. Perancangan alat ini menggunakan beberapa komponen yaitu LWLP5000-5XD sebagai sensor tekanan udara, SHT-10 sebagai sensor suhu dan kelembaban. Untuk modul mikrokontroler dipilih ESP32 yang terintegrasi dan memiliki fitur lengkap serta kinerja tinggi. Modul ini merupakan pengembangan dari ESP8266, yang merupakan modul WiFi populer. ESP32 memiliki dua prosesor komputasi, satu prosesor untuk mengelola jaringan WiFi dan Bluetooth, serta satu prosesor lainnya untuk menjalankan aplikasi. Dilengkapi dengan memori RAM yang cukup besar untuk menyimpan informasi. Fitur yang berguna seperti TCP/IP, HTTP, dan FTP.

Perbedaan antara penelitian yang peneliti kembangkan dengan penelitian yang lain seperti yang telah disampaikan pada referensi diatas adalah, penggunaan teknologi *Internet Of Things* dengan aplikasi berbasis web. Aplikasi

berbasis web dipilih dikarenakan selain data dapat dipantau dari jarak jauh melalui *Smart Phone*, data juga dapat dipantau melalui komputer yang terhubung dengan internet, dimana saat ini di Rumah Sakit Pandan Arang Kabupaten Boyolali khususnya di ruangan teknisi, perangkat komputer dengan jaringan internet telah tersedia. Penggunaan sensor tekanan udara LWLP5000-5XD, yaitu sensor yang biasa digunakan pada industri dan mempunyai karakteristik dapat mendeteksi dan mengukur tekanan udara yang tinggi juga merupakan perbedaan dengan penelitian sebelumnya. Walaupun sudah ada yang menggunakan, pemanfaatan ESP32 dalam pengembangan alat monitoring suhu, kelembaban dan tekanan udara berbasis *Internet Of Things* dengan metode *Proportional Integral Derivative* (*PID*) pada ruang operasi sebagai modul mikrokontroler terintegrasi juga merupakan salah satu hal yang membedakan penelitian ini dengan penelitian yang lainnya.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Ruang Operasi

Ruang operasi rumah sakit adalah ruangan khusus yang berfungsi untuk melakukan pembedahan dan tindakan operasi. Ruang operasi merupakan salah satu bagian vital di rumah sakit yang dilengkapi dengan peralatan medis lengkap dan tim dokter dan tenaga paramedis profesional.

Ruang operasi memiliki beberapa karakteristik, di antaranya: mengutamakan aspek hirarki zonasi sterilitas, luas ruangan harus cukup untuk memungkinkan petugas bergerak sekeliling peralatan operasi, diwajibkan menggunakan pendingin udara (AC) dengan suhu 19–24° C dan kelembaban 45–60% dan memiliki lingkungan yang aman dan nyaman [5].

Standar Baku Mutu dan Persyaratan Kesehatan Udara di Ruang Operasi diantaranya :

a. Standar Baku Mutu Udara

Standar baku mutu parameter mikrobiologi udara Standar baku mutu parameter mikrobiologi udara menjamin kualitas udara ruangan

memenuhi ketentuan angka kuman dengan indeks angka kuman untuk setiap ruang/unit seperti Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Indeks Angka Kuman

No	Ruang	Konsentrasi Maksimum Mikroorganisme (cfu/m ³) Per m ³ Udara (cfu/m ³)
1	Ruang operasi kosong	35
2	Ruang operasi dengan aktifitas	180
3	Ruang operasi <i>Ultraclean</i>	10

b. Standar Baku Mutu Parameter Fisik Udara

Standar baku mutu parameter fisik untuk udara menjamin kualitas udara ruangan memenuhi ketentuan laju ventilasi, suhu, kelembaban, tekanan, pencahayaan, kebisingan, dan partikulat sesuai dengan jenis ruangan, berdasarkan Tabel 2.2 dan Tabel 2.3.

Tabel 2.2 Standar Baku Mutu Laju Ventilasi

No	Ruang/ Unit	Suplai Udara M ³ /Jam/Orang	Pertukaran Udara Kali/Jam	Kecepatan Laju Udara m/detik
1	Operasi	2,8	Minimal 10	0,3 - 0,4
2	Perawatan bayi premature	2,8		0,15 - 0,25
3	Ruang luka bakar	2,8	Minimal 5	0,15 – 0,25

Tabel 2.3 Standar Baku Mutu Suhu dan Kelembaban

No	Ruang/Unit	Suhu (°C)	Kelembaban (%)	Tekanan
1	Operasi	22-27	40- 60	Positif
2	Bersalin	24-26	40- 60	Positif
3	Pemulihan/perawatan	22-23	40- 60	Seimbang

4	Observasi bayi	27-30	40- 60	Seimbang
5	Perawatan bayi	32-34	40- 60	Seimbang
6	Perawatan	32-34	40- 60	Positif
7	ICU	22-23	40- 60	Positif
8	Jenazah/Autopsi	21-24	40- 60	Negatif
9	Penginderaan medis	20-22	40- 60	Seimbang
10	Laboratorium	20-22	40- 60	Negatif
11	Radiologi	17-22	40- 60	Seimbang
12	Sterilisasi	21-30	40- 60	Negatif
13	Dapur	22-30	40- 60	Seimbang
14	Gawat darurat	20-24	40- 60	Positif
15	Administrasi	20-28	40- 60	Seimbang
16	Ruang Luka bakar	24-26	40- 60	Positif

2.2.2 *Internet Of Things*

Internet of Things (IoT) merupakan teknologi mutakhir yang mengacu pada berbagai perangkat dan sistem di seluruh dunia yang saling terhubung melalui internet untuk berbagi data. Teknologi ini melibatkan penggunaan sensor dan perangkat lunak komunikasi untuk mengontrol, menghubungkan, dan mentransfer data antarperangkat dengan memanfaatkan jaringan internet, memungkinkan kinerja tanpa pengawasan langsung [7].

Dalam penerapannya, IoT memiliki konsep dasar yang terintegrasi dengan berbagai teknologi seperti *Artificial Intelligence* (AI), *cloud computing*, dan teknologi pendukung lainnya. Hal yang sama juga diterapkan di bidang kesehatan yang memanfaatkan integrasi tersebut. Teknologi AI dalam sistem IoT berfungsi untuk membantu proses diagnosis penyakit, memberi rekomendasi pengobatan, serta mendukung berbagai tindakan medis. Dengan kemampuan AI yang dapat berpikir seperti manusia, proses pengambilan keputusan terkait kondisi pasien menjadi lebih mudah dan cepat.

Data yang telah diperoleh melalui teknologi tersebut kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi serta memprediksi kemungkinan penyakit atau

kondisi kesehatan pasien. Selain itu, teknologi cloud computing dalam IoT berperan dalam penyimpanan dan pengelolaan seluruh data penting rumah sakit maupun pasien. *Cloud computing* memungkinkan pengguna untuk mengakses informasi yang sama meskipun berada di lokasi berbeda, sehingga layanan kesehatan dapat berjalan lebih optimal dan efisien.

Berikut beberapa contoh penerapan IoT dalam bidang kesehatan [15] :

1. Pemantauan kesehatan

Berkat adanya teknologi berbasis internet ini, pasien dan dokter semakin dipermudah dalam memantau perkembangan kesehatan tubuh. Teknologi ini memungkinkan adanya pemantauan kesehatan secara *real time* yang bisa dilakukan dari mana saja dan kapan saja.

Layanan *Healthtech* serta perangkat seperti *smartwatch* kini sudah sangat umum digunakan untuk menampilkan informasi terkait kondisi kesehatan. Melalui aplikasi maupun perangkat tersebut, pengguna dapat mengetahui berbagai data seperti tekanan darah, kadar glukosa, jumlah mineral dalam tubuh, dan informasi kesehatan lainnya. Data pemantauan ini memungkinkan pasien untuk segera mengambil tindakan yang diperlukan, misalnya dengan minum air dalam jumlah cukup, menyuntikkan insulin, atau tindakan mandiri lainnya.

Informasi hasil pemantauan tersebut juga membantu dokter dalam menentukan tindakan medis yang tepat. Dengan demikian, apabila ditemukan adanya ketidakwajaran pada data kesehatan, pasien dapat segera dirujuk atau melakukan kunjungan ke rumah sakit maupun layanan kesehatan lainnya untuk mendapatkan penanganan lebih lanjut.

2. *Telemedicine*

Layanan perawatan jarak jauh atau *telemedicine* memanfaatkan teknologi IoT untuk membantu tenaga medis memantau kondisi pasien dengan lebih mudah. *Telemedicine* menggunakan teknologi AI, salah satunya melalui pemindaian wajah dengan sensor kamera, yang memungkinkan komunikasi antara tenaga medis dan pasien berlangsung secara *virtual*.

Dengan penerapan internet dalam dunia medis melalui *telemedicine*, efisiensi waktu dan biaya dapat tercapai baik bagi pasien maupun pihak rumah sakit. Pasien tidak perlu mengeluarkan biaya perjalanan untuk datang ke rumah sakit, sementara rumah sakit dapat mengurangi pengeluaran terkait fasilitas pelayanan kesehatan.

3. Pemeliharaan Peralatan

Salah satu kendala yang sering dihadapi oleh layanan kesehatan adalah risiko kerusakan hingga pencurian perangkat atau alat-alat kesehatan. Untuk itu, teknologi IoT diterapkan untuk bantu melacak setiap perangkat tersebut apabila mengalami kerusakan atau permasalahan lainnya.

Rumah sakit atau klinik akan memiliki manajemen aset yang baik karena perangkat yang terhubung dengan IoT akan memberi respon dan informasi secara *real time* untuk segera diambil keputusan.

Dengan begitu, kualitas dan ketersediaan perangkat kesehatan pun akan terjamin dan bisa digunakan secara optimal untuk perawatan.

2.2.3 *Proportional Integral Derivative (PID)*

Kontroler *Proportional Integral Derivative* (PID) adalah algoritma kontrol umpan balik yang sangat umum digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Secara sederhana, kontroler PID merupakan sistem kendali otomatis yang bekerja dengan membandingkan nilai *setpoint* (nilai yang diharapkan) dengan nilai umpan balik (nilai aktual). Tujuan utama kontroler PID adalah menjaga agar variabel proses tetap berada pada *setpoint* yang telah ditentukan dengan melakukan koreksi terhadap setiap perubahan yang muncul. Melalui mekanisme ini, kontroler PID menghasilkan sinyal kendali untuk mengatur sistem sehingga dapat mencapai nilai *setpoint* secara cepat dan akurat. [16].

Dalam beberapa hal penggunaan fuzzy dirasa lebih tepat dikarenakan Fuzzy adalah sistem yang cerdas. Tanpa mengetahui pemodelan yang tepat, sistem ini dapat menghasilkan kontrol yang baik. Selain itu, sistem ini lebih baik

daripada kontrol PID karena dapat beradaptasi terhadap gangguan yang ada. Hal ini diterapkan secara tepat pada sistem ini, terutama pada kapal-kapal yang sering mengalami perubahan aliran air secara tiba-tiba. Dengan kontrol PID, sebenarnya dapat mengatasi masalah ini, tetapi penyesuaian nilai parameter PID tetap diperlukan, sementara dengan kontrol fuzzy hal ini tidak diperlukan [16].

Sementara itu, dalam pemanfaatan sistem kendali yang sifatnya lebih sederhana, pemanfaatan kontrol PID menawarkan sejumlah manfaat. Pada dasarnya, kontrol proporsional (P) adalah penguat dengan penguatan yang dapat diatur. Kontrol ini akan meningkatkan *overshoot*, mengurangi kesalahan *steady state*, dan memperpendek waktu naik. Selain berfungsi menghilangkan kesalahan *steady state*, kontrol integral (I) akan menghasilkan respon transien yang di bawah standar. Sementara itu, kontrol derivatif (D) akan meningkatkan respon transfer, mengurangi overshoot, dan meningkatkan stabilitas sistem [17].

Pada kontrol PID, nilai yang diinginkan atau *setpoint* dibandingkan dengan nilai aktual atau proses variabel, lalu *error* dihitung dan sinyal koreksi diberikan oleh kendali gerbang yang mengukur tiga komponen: proporsional, integral, dan derivatif. Keluaran dari kontrol PID secara matematis dapat dinyatakan dalam persamaan (2.1) [18]:

$$m\upsilon(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\mathcal{T}) d\mathcal{T} + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Dimana:

- $e(t)$: *Error* (selisih antara setpoint dan pembacaan sensor)
- K_p : Kontrol *proporsional* (respon langsung terhadap *error*)
- K_i : Kontrol *integral* (menghilangkan *error* yang tersisa)
- K_d : Kontrol *derivatif* (meredam perubahan mendadak)

- $mv(t)$: Output dari pengontrol PID atau *Manipulated Variabel*

Setiap komponen dalam PID mempunyai peran sebagai berikut :

1. *Proportional (P)*

Berguna untuk memberikan respons yang sebanding terhadap error. Semakin besar *error*, semakin besar sinyal kontrol. Namun, penggunaan P saja biasanya menyisakan *error* kecil yang tertinggal.

2. *Integral (I)*

Berguna untuk mengakumulasi *error* dari waktu ke waktu untuk menghilangkan *error* kecil yang tertinggal, namun berisiko menyebabkan *overshoot* (melewati target) jika tidak dikendalikan.

3. *Derivative (D)*

Berguna untuk memberikan prediksi terhadap perubahan error, membantu mengurangi *overshoot* dan meningkatkan stabilitas pada sistem.

Sedangkan manfaat PID dalam pengendalian laju udara adalah :

1. Menjaga konsistensi tekanan dan aliran udara.
2. Merespon dengan cepat terhadap perubahan (misalkan: pintu yang terbuka).
3. Menghindari *overshoot* yang bisa mengganggu sistem steril ruang.
4. Menghemat energi karena motor kipas bekerja sesuai dengan kebutuhan.

2.2.4 ESP32

ESP32 adalah modul mikrokontroler berfitur lengkap dengan performa tinggi yang merupakan pengembangan dari ESP8266. Modul ini dilengkapi dua prosesor, di mana satu prosesor digunakan untuk menangani koneksi WiFi dan



Gambar 2.1 ESP 32

Bluetooth, sedangkan prosesor lainnya bertugas menjalankan aplikasi. ESP32 memiliki kapasitas RAM yang cukup besar serta mendukung berbagai protokol seperti TCP/IP, HTTP, dan FTP. Selain itu, modul ini memiliki kemampuan pemrosesan sinyal analog, dukungan berbagai jenis sensor, serta antarmuka I/O digital. [17].

ESP32 juga menyediakan konektivitas *Bluetooth* sehingga dapat digunakan untuk mengontrol perangkat berbasis *Bluetooth*. Bentuk fisik ESP32 ditunjukkan pada Gambar 2.1. Modul ini sangat sesuai untuk proyek *Internet of Things* (IoT) karena mampu terhubung ke jaringan internet dengan mudah dan mendukung pemrosesan sinyal analog serta perangkat I/O digital. ESP32 tersedia dalam bentuk modul terpisah maupun papan sirkuit terpadu (PCB) yang siap digunakan.

Modul ini dikembangkan oleh *Espressif Systems* dan merupakan peningkatan dari ESP8266, dilengkapi dua CPU yang bekerja pada frekuensi 80 MHz hingga 160 MHz. ESP32 juga memiliki berbagai peripheral seperti ADC, DAC, I2C, I2S, SPI, dan UART, sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi.

Salah satu keunggulan utama ESP32 adalah kemampuannya terkoneksi dengan internet melalui protokol TCP/IP, yang memungkinkannya berkomunikasi dengan perangkat lain. Selain WiFi, modul ini juga mendukung *Bluetooth* sehingga semakin fleksibel dalam pemanfaatannya.

ESP32 sangat ideal untuk aplikasi IoT, sistem kontrol, monitoring, dan berbagai aplikasi lainnya. Modul ini juga memiliki fitur *deep sleep* untuk menghemat daya ketika perangkat tidak digunakan. Selain itu, keberadaan modul DSP memungkinkan pemrosesan sinyal lebih cepat dan efisien. Memori sebesar 520 KB tersedia untuk penyimpanan program dan data, dan modul ini dapat diprogram menggunakan bahasa C atau C++.

Secara keseluruhan, ESP32 merupakan modul WiFi yang lengkap, memiliki banyak fitur, konsumsi daya rendah, dan tersedia dengan harga yang terjangkau. Dengan kemampuan *multitasking* yang baik serta kemudahan integrasi, ESP32 menjadi pilihan yang tepat untuk berbagai proyek IoT dan

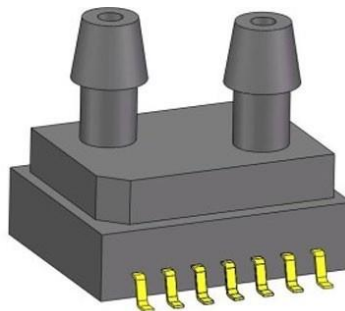
kebutuhan komunikasi jarak jauh.

2.2.5 LWLP5000-5XD

LWLP5000-5XD merupakan sensor integrasi tekanan diferensial ultra rendah beresolusi tinggi, sensor ini merangkum chip tekanan MEMS berkinerja tinggi dan chip pengkondisian. Hal Ini akan memberi pengukuran perbandingan antara dua titik untuk mengurangi efek yang disebabkan karena pengaruh lingkungan pada output. LWLP5000-5XD mengadopsi algoritma kompensasi suhu multi-tahap yang unik dengan output digital I2C, sensor ini tersedia dengan mode asupan pengukur udara atau tekanan diferensial [19].

Prinsip kerja dari sensor LWLP5000-5XD ini adalah menggunakan elemen pengindera tekanan (biasanya piezoresistif atau strain gauge) yang mendeteksi perubahan tekanan udara/gas yang masuk ke dalam port sensornya. Sensor ini memiliki rangkaian penguat internal. Saat tekanan diterapkan, elemen pengindera mengubah tekanan fisik menjadi sinyal listrik (mikrovolt). Sinyal tersebut diperkuat dan diubah menjadi tegangan analog dalam rentang 0.5 V hingga 4.5 V. Tegangan akan berubah secara linear seiring perubahan tekanan. Tegangan analog dari sensor disambungkan ke pin ADC ESP32 (contoh: GPIO32 atau GPIO33). ESP32 akan mengubah sinyal analog ini menjadi nilai digital (ADC), misalnya dari 0–4095 (12-bit). Nilai ADC kemudian dikonversi menjadi tekanan dalam satuan yang diinginkan (misalnya mbar, psi, atau cmH₂O).

Tampilan fisik sensor tekanan LWLP5000-5XD terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 LWLP5000-5XD

Modul sensor tekanan LWLP5000-5XD mempunyai spesifikasi: *Range* pengukuran $\pm 500\text{Pa}$, tipe pengukuran tekanan *Differential*, sistem komunikasi dengan I2C dan dapat diaplikasikan pada : kontrol industri, peralatan kebugaran, pemantauan kesehatan, aplikasi otomotif dan peralatan rumah tangga. Tekanan dapat dihitung dalam persamaan [19] :

$$P(\text{Pa}) = \left(\frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{2^{14}} \right) \times P1 + P_{\text{min}} \quad (2.2)$$

Dimana :

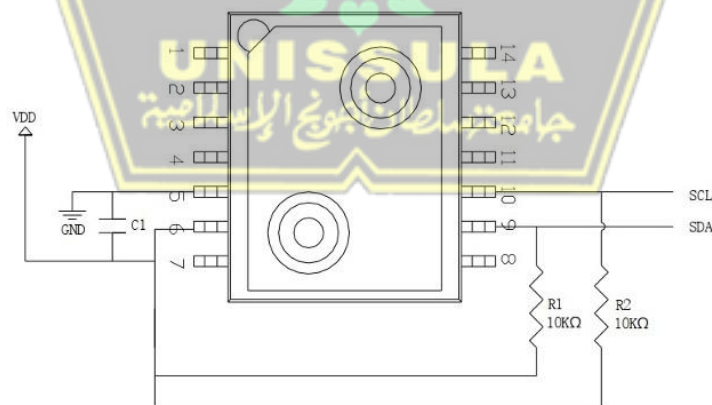
P : Nilai keluaran tekanan

$P1$: I2C data tekanan pada titik tekanan

P_{max} : Batas atas tekanan

P_{min} : Batas bawah tekanan

Blok diagram fungsi sensor tekanan LWLP5000-5XD, ditampilkan seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Blok Diagram Fungsi Sensor Tekanan LWLP5000-5XD

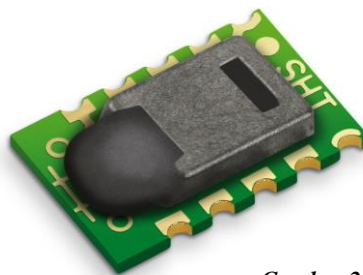
VDD/GND/SDA/SCL harus dinyalakan dan dimatikan secara bersamaan untuk menghindari transmisi data yang tidak lengkap yang dapat menyebabkan sensor masuk ke mode *Busy*. Setelah sensor dalam mode *Busy*, sensor tidak akan memproses data yang baru dan hasil keluaran akan tidak normal.

2.2.6 SHT-10

Seri sensor kelembapan SHT1x (termasuk SHT10, SHT11, dan SHT15) adalah keluarga sensor kelembapan yang dapat dipasang di area permukaan. Seri SHT1x terdiri dari versi murah dengan menggunakan sensor kelembapan SHT10. Sensor kelembapan mengintegrasikan elemen sensor ditambah pemrosesan sinyal pada *footprint* yang sangat kecil dan menyediakan keluaran digital yang dikalibrasi sepenuhnya. Elemen sensor kapasitif yang unik digunakan untuk mengukur kelembapan, sementara suhu diukur oleh sensor band-gap. Teknologi CMOSens®-nya menjamin keandalan yang sangat baik dan stabilitas jangka panjang. Sensor kelembapan digabungkan ke konverter *analog to digital* 14-bit dan sirkuit antarmuka serial. Hal ini menghasilkan kualitas sinyal yang unggul, waktu respons yang cepat, dan tidak sensitif terhadap gangguan eksternal (EMC) [20].

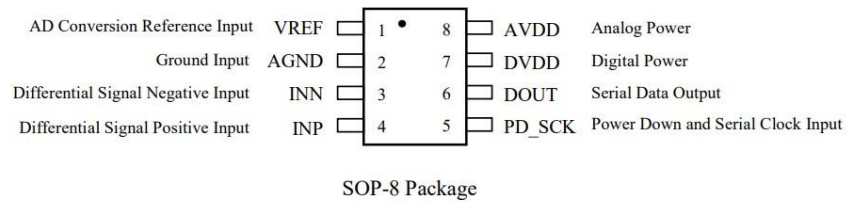
Setiap sensor kelembapan SHT10 dikalibrasi secara individual dalam ruang kelembapan yang presisi. Koefisien kalibrasi diprogram ke dalam memori OTP pada chip.

Koefisien ini digunakan untuk mengkalibrasi sinyal dari sensor secara internal. Antarmuka serial dua kabel dan pengaturan tegangan internal memungkinkan untuk terintegrasi dengan sistem dengan mudah. Tampilan SHT10 terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sensor SHT10

Sedangkan diskripsi pin SHT 10 dapat ditampilkan pada Gambar 2.4



Pin #	Name	Function	Description
1	VREF	Analog Input	Reference input voltage: 1.8 ~ 5.5V (\leq AVDD)
2	AGND	Ground	Analog Ground
3	INN	Analog Input	Differential signal negative input
4	INP	Analog Input	Differential signal positive input
5	PD_SCK	Digital Input	Power down control (high active) and serial clock input
6	DOUT	Digital Output	Serial data output
7	DVDD	Power	Digital supply: 2.6 ~ 5.5V (DVDD \geq AVDD)
8	AVDD	Power	Analog supply: 2.6 ~ 5.5V

Gambar 2.4 Diskripsi Pin SHT10

2.2.7 LCD (*Liquid Crystal Display*) TFT SPI

LCD merupakan display untuk menampilkan karakter berupa huruf, angka, maupun simbol. Prinsip kerja dari LCD yaitu dengan menggunakan kristal cair yang berubah orientasinya untuk mengontrol cahaya dan menghasilkan tampilan. LCD dilengkapi dengan lampu latar (*backlight*) untuk meningkatkan kemampuan pandang dalam kondisi pencahayaan rendah. TFT SPI Arduino merupakan layar *Liquid Crystal Display* (LCD) yang menggunakan *Serial Peripheral Interface* (SPI) untuk berkomunikasi dengan mikrokontroler. TFT SPI Arduino dapat digunakan untuk menampilkan data sensor, pesan teks, dan informasi status. TFT (*Thin-Film Transistor*) SPI (*Serial Peripheral Interface*) Arduino adalah jenis layar LCD yang menggunakan antarmuka SPI untuk berkomunikasi dengan mikrokontroler seperti Arduino. Layar ini memungkinkan pengiriman data serial yang efisien, menggunakan lebih sedikit pin dibandingkan antarmuka paralel. TFT SPI Arduino sering digunakan untuk menampilkan data sensor, pesan teks, dan informasi status dalam berbagai

proyek elektronik. Modul TFT SPI biasanya kompatibel dengan pustaka grafis seperti *Adafruit GFX*, yang memudahkan pengembangan antarmuka pengguna [21].

LCD yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi untuk memberikan tampilan monitoring secara *real time* berupa grafik tekanan, suhu, dan kelembaban serta ditambah fitur *setpoint (input)* untuk kendali tekanan. Tampilan fisik LCD seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Tampilan Fisik LCD SPI

2.2.8 Motor Kipas

Fungsi dari motor kipas inik adalah memberikan aliran udara tekan (*positive pressure*) ke dalam *chamber prototype*, sesuai dengan fungsi sistem kontrol tekanan udara yang dkerjakan. Motor yang digunakan adalah merk *gdstime* yang dapat terintegrasi dengan arduino dan ESP 32. Arduino bisa mengeluarkan sinyal kontrol 5 Volt (PWM) dengan arus kecil, sehingga dalam penggunaannya motor kipas ini tidak diperbolehkan langsung disuplai dari pin arduino. Sehingga perlu adanya *driver* agar sinyal arduino bisa mengendalikan kipas 12 volt. Motor kipas *gdstime* mempunyai kelebihan desain *brushless turbo blower* centrifugalnya dapat memberikan aliran udara terkonsentrasi dan bertenaga, cocok untuk aplikasi yang memerlukan pendinginan dengan tekanan pada arah tertentu. Kelebihan lainnya adalah menggunakan *sleeve bearing* yang mempunyai suara relatif senyap namun umurnya sedikit lebih pendek dibandingkan *ball bearing*. Spesifikasi dari motor kipas *gdstime* ini adalah mempunyai arus nominal 0,26 A, kecepatan 3.200 RPM, aliran udara 22 m³/jam, dengan daya 3.2 watt. Tampilan fisik dari motor kipas *gdstime* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Tampilan Fisik Motor Kipas

2.2.9 Kalibrasi

Kalibrasi dilakukan untuk memastikan bahwa sensor-sensor yang digunakan dalam sistem pengukuran memberikan data yang akurat dan konsisten. Kalibrasi sensor merupakan proses penyesuaian dan verifikasi terhadap instrumen ukur agar hasil pembacaannya sesuai dengan nilai rujukan standar. Melalui kalibrasi, hubungan antara nilai keluaran sensor dan nilai sebenarnya dapat diketahui, sehingga karakteristik kesalahan pengukuran dapat diminimalkan. Akurasi menunjukkan tingkat kedekatan hasil pengukuran sensor terhadap nilai sebenarnya dan menjadi salah satu parameter penting dalam menentukan kualitas instrumen. Sedangkan *error* merupakan selisih antara nilai terukur dengan nilai acuan, yang dapat muncul akibat ketidakstabilan sensor, pengaruh lingkungan, atau kesalahan sistematis. Selain itu, deviasi digunakan untuk menggambarkan seberapa besar penyebaran hasil pengukuran terhadap nilai rata-rata, sehingga memberikan gambaran mengenai konsistensi dan *repeatability* dari sensor. Dengan memperhatikan kalibrasi, akurasi, *error*, dan deviasi, performa sensor dalam sistem monitoring dapat dipastikan bekerja secara reliabel, presisi, dan sesuai dengan standar pengukuran.

Proses kalibrasi dilakukan terhadap sensor tekanan, sensor suhu, dan sensor kelembaban dengan membandingkan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur pembanding, yaitu magnehelic gauge untuk tekanan, serta thermohygrometer untuk suhu dan kelembaban. Nilai akurasi pengukuran suhu

diperoleh dengan menghitung selisih antara rata-rata hasil pengukuran *prototype* terhadap nilai pengukuran suhu, kelembaban dan tekanan menggunakan alat ukur pembanding (referensi), selisih nilai ini dibagi dengan nilai suhu referensi tersebut, hasil pembagian ini harus dalam bentuk nilai mutlak untuk kemudian dikalikan dengan 100%, hasil operasi perhitungan ini disebut sebagai persentase *error* dalam pengukuran. Akurasi merupakan pengurangan antara nilai akurasi yang diinginkan yaitu 100% terhadap nilai persentase *error* yang di dapatkan [22]. Persentase *error* dinyatakan pada Persamaan (2.3)

$$\begin{aligned} \text{Persentase Error} & \quad (2.3) \\ &= \frac{\text{Nilai Referensi} - \text{Nilai terukur}}{\text{Nilai Referensi}} \times 100\% \end{aligned}$$

Sedangkan persentase akurasi dinyatakan dalam Persamaan (2.4).

$$\text{Persentase Akurasi} = 100\% - \text{Persentase Error} \quad (2.4)$$

Sebagai upaya evaluasi kelayakan sensor, menurut standar umum kalibrasi suhu lingkungan, toleransi error yang diizinkan adalah $\pm 1^{\circ}\text{C}$ atau $\pm 2\%$ dan akurasi kelembaban $\pm 3\%$ RH [23]. Sedangkan toleransi maksimal yang diijinkan untuk pengukur tekanan udara adalah $\pm 2\%$ atau ± 1 Pa pengukuran dari alat referensi [24]. Tampilan magnehelig sebagai alat ukur tekanan pembanding seperti Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Magnehelig

Untuk tampilan thermohygrometer sebagai alat ukur pembanding suhu dan kelembaban seperti Gambar 2.8.

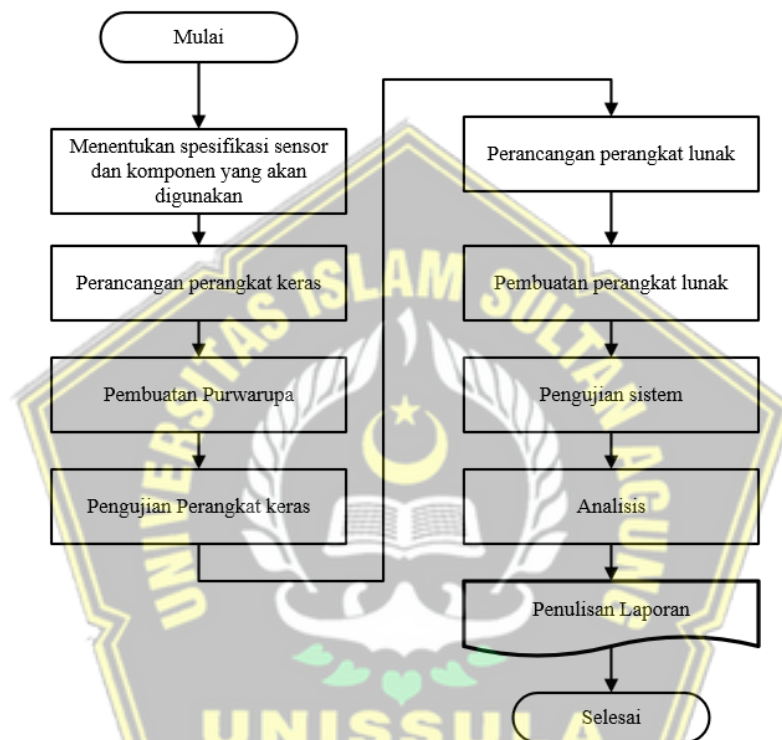


Gambar 2.8 Thermohygrometer

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Langkah Langkah Penelitian

Untuk mempermudah dalam melakukan penelitian, dibuatlah diagram alir tahapan penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.

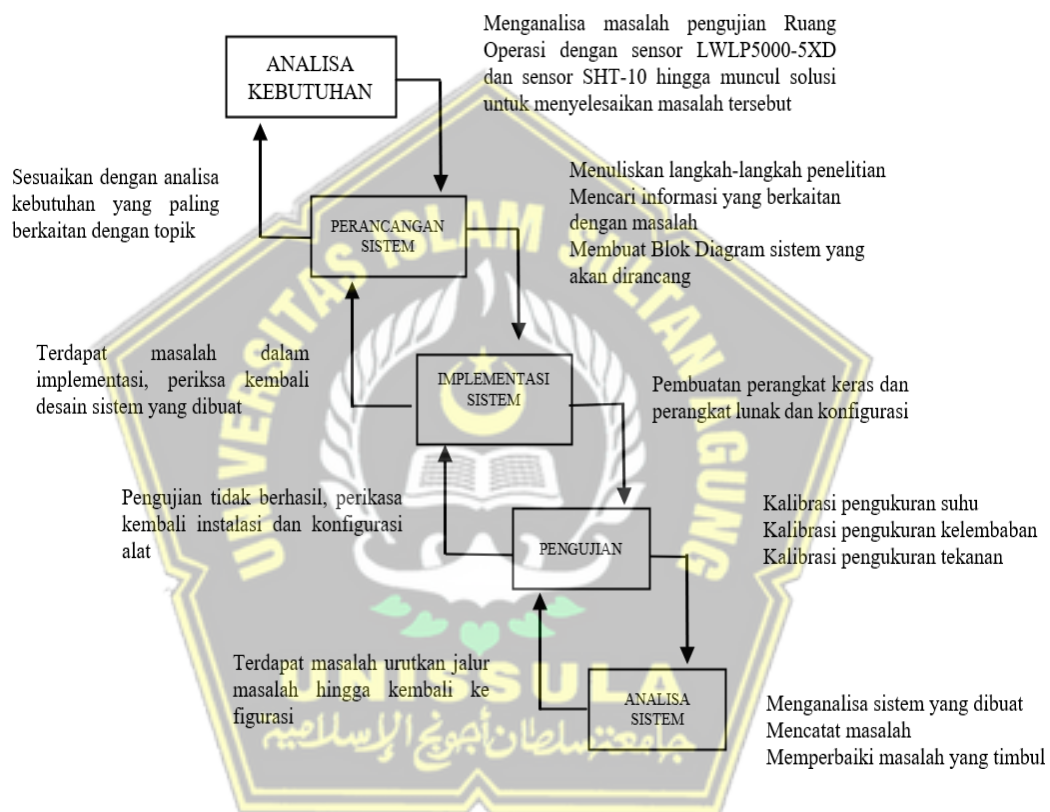


Gambar 3.1 Langkah Langkah Penelitian

Berdasarkan Gambar 3.1, 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. Sistem yang telah selesai dan dikalibrasi kemudian dianalisis hasil pembacaannya, dan seluruh proses dituangkan dalam laporan tesis.

3.2 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 3.1.



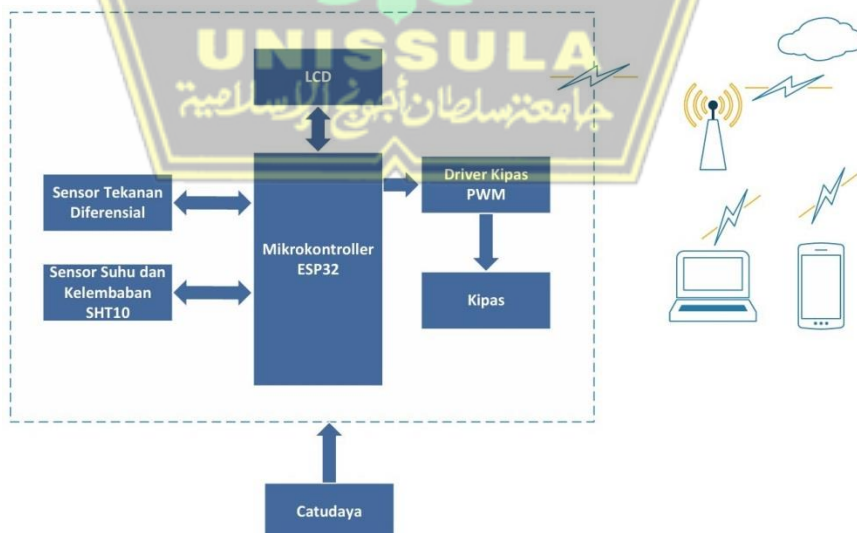
Gambar 3.1 Diagram Air Terjun Metode Penelitian

Langkah – langkah penelitian diterangkan seperti berikut :

1. Analisa kebutuhan komponen yang sesuai dengan tentang mekanisme pengukuran dan pengujian suhu, kelembaban dan tekanan udara pada ruang operasi.
2. Menganalisa masalah apa saja yang muncul pada komponen yang akan dipakai dalam pengukuran suhu, kelembaban dan tekanan pada ruang operasi.
3. Perancangan sistem meliputi pembuatan blok diagram, desain rangkaian, serta perancangan *software* dan *hardware*.
4. Implementasi sistem mencakup pembangunan *hardware* dan *software* berdasarkan desain, kemudian dilanjutkan dengan pemasangan perangkat di ruang operasi (suhu, kelembaban dan tekanan).
5. Pengujian sistem dilakukan dengan cara kalibrasi pengukuran suhu, kelembaban dan tekanan udara serta pencatatan data hasil pengujian.
6. Analisis sistem yaitu menganalisis data hasil pengujian perbandingan beberapa variasi pengukuran suhu, kelembaban dan tekanan udara.

3.3 Perancangan Sistem

Diagram blok sistem yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem

Sistem mempunyai 2 jenis sensor yang digunakan dalam parameter pengujian suhu, kelembaban dan tekanan ruang yaitu berupa 1 buah sensor

tekanan LWLP5000-5XD dan 1 buah sensor suhu dan kelembaban SHT-10. Sensor-sensor ini dipasang dalam satu tempat (wadah) yang berfungsi melakukan pengukuran kondisi ruang secara bersamaan. Catu daya (7,4V) berfungsi untuk menyalakan alat monitoring suhu, kelembaban dan kendali tekanan udara pada ruang operasi di Rumah Sakit Pandan Arang Kabupaten Boyolali. Sebelum menuju ke modul yang lain, saklar perlu dinyalakan terlebih dahulu, setelah saklar dalam posisi *on*, maka tegangan dari catu daya akan diturunkan menggunakan *step down* menjadi 5V untuk menyuplai ESP32, kemudian ESP32 akan mengirim sinyal hasil pembacaan sensor suhu dan kelembaban SHT-10 dan sensor tekanan udara LWLP5000-5XD ke LCD dan ke *Smart Phone* maupun layar komputer melalui jaringan internet. Metode PID digunakan untuk mengendalikan sistem ini. Langkah pertama adalah dengan cara menentukan *setpoint*. Sensor tekanan membaca nilai tekanan aktual (*Process Variable*) dimana *error* akan dihitung dari pengurangan nilai *setpoint* dan nilai *process variable*. Selanjutnya Algoritma PID akan menghitung nilai koreksi berdasarkan tiga parameter yaitu (*Proportional, Integral dan Derivative*). Output kendali PID digunakan untuk mengatur kecepatan kipas melalui *Pulse Weight Modulation* (PWM), dimana aktuator berfungsi untuk menambah/ mengurangi tekanan dalam ruang operasi. Untuk mendapatkan sistem yang stabil dan responsif, nilai K_p , K_i dan K_d diatur dengan cara *trial and error*.

3.4 Perancangan Rangkaian Mikrokontroler

Detail dari rancangan *schematic* monitoring, suhu, kelembaban dan tekanan dalam rangkaian terlihat pada Gambar 3.3.

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.

3.5 Perancangan Program Mikrokontroler

Mikrokontroler yang digunakan pada penelitian ini yaitu ESP32 DevKit V1. Mikrokontroler ini menggunakan prosesor 32-bit LX6 dengan frekuensi clock 60 MHz. Agar mikrokontroler dapat beroperasi, diperlukan perancangan

firmware yang ditanamkan ke dalam chip. *Firmware* merupakan program permanen yang ditempatkan pada memori baca-saja (ROM), baik berupa EEPROM maupun *Flash Memory*. Tahap awal dalam pengembangan *firmware* dimulai dengan menyusun diagram alir yang menggambarkan alur program yang akan dibuat.

Perancangan *firmware* untuk alat yang dibuat pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5.

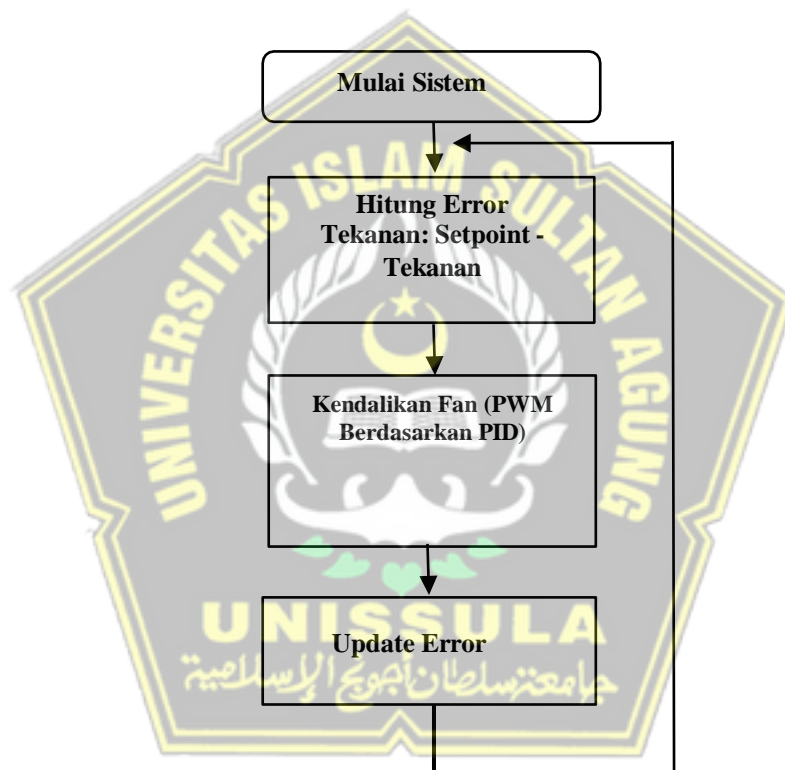


Gambar 3.4 Diagram Alir Firmware (Core 0)

Diagram alir pada Gambar 3.4 menunjukkan proses kerja *firmware* pada ESP32 Core 0 dalam melakukan monitoring tekanan, suhu, dan kelembaban ruang operasi. Proses dimulai ketika sistem diaktifkan, kemudian ESP32 melakukan inisialisasi terhadap modul WiFi, sensor tekanan LWLP5000, sensor suhu dan kelembaban SHT-10, serta tampilan LCD. Setelah seluruh komponen siap, sistem

membaca data tekanan, suhu, dan kelembaban secara berkala. Data hasil pembacaan kemudian dikirimkan ke cloud untuk keperluan monitoring jarak jauh dan penyimpanan data, serta ditampilkan secara *real time* pada LCD. Seluruh proses ini berjalan secara berulang sehingga data kondisi ruang operasi selalu diperbarui secara *real time*.

Diagram alir pada Gambar 3.5 menggambarkan proses kerja *firmware* pada ESP32 Core 1 yang berfungsi khusus untuk menjalankan pengendalian tekanan menggunakan algoritma PID.



Gambar 3.5 Diagram Alir Firmware (Core 1)

Proses dimulai ketika sistem aktif, kemudian Core 1 menghitung nilai *error* tekanan yang diperoleh dari selisih antara nilai *setpoint* dan nilai tekanan aktual. Nilai *error* ini selanjutnya digunakan oleh pengendali PID untuk menentukan besar keluaran kendali, yang dikirimkan dalam bentuk sinyal PWM untuk mengatur kecepatan fan kompresor. Setelah itu, sistem memperbarui nilai *error* sebelumnya yang akan digunakan pada perhitungan berikutnya, terutama untuk komponen integral dan derivatif dalam PID. Proses ini berlangsung secara

terus-menerus dalam sebuah *loop* sehingga kontrol tekanan dapat dilakukan secara *real time* dan responsif terhadap perubahan kondisi di dalam ruang operasi.

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.

Berdasarkan perhitungan kebutuhan data sebesar ± 300 bytes per pengiriman, maka satu perangkat IoT membutuhkan *bandwidth* sekitar 2.4 kbps pada interval 1 detik. Dengan mempertimbangkan *overhead* jaringan dan faktor keamanan 2–3 kali, maka kebutuhan *bandwidth* yang direkomendasikan adalah sekitar 7–10 kbps. Kapasitas ini sangat rendah dibandingkan kemampuan jaringan WiFi pada umumnya sehingga sistem dapat berjalan lancar tanpa gangguan.

3.6 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.

3.7 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Ruang Operasi dan *Workshop* Instalasi Pemeliharaan Sarana Rumah Sakit (IPSRS) Rumah Sakit Pandan Arang Kabupaten Boyolali yang meliputi perancangan alat, pengujian alat, dan analisa data. Waktu penelitian dilakukan pada bulan April 2025 hingga bulan Juli 2025.

Objek yang diteliti adalah ruangan tindakan operasi di Rumah Sakit Pandan Arang Boyolali. Ruang tindakan operasi di Rumah Sakit Pandan Arang Boyolali tampak dari depan terlihat pada Gambar 3.6 dan ruang tindakan operasi di Rumah Sakit Pandan Arang Boyolali tampak dari dalam terlihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.6 Ruang Tindakan Operasi di Rumah Sakit Pandan Arang Boyolali Tampak Depan



Gambar 3.7 Ruang Tindakan Operasi di Rumah Sakit Pandan Arang Boyolali Tampak Dalam

Sedangkan rencana penelitian diuraikan pada Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1 Rencana Penelitian

Bulan	Minggu Ke	Kegiatan
April	1–15	Finalisasi judul, konsultasi, studi literatur
	16–29	Penyusunan Bab 1 dan Bab 2
Mei	1–14	Penyusunan Bab 3
	15–16	Seminar Proposal
Juni	1–15	Implementasi dan pengujian sistem
	15–27	Tulis Bab 4 dan analisis data
Juli	1–20	Tulis Bab 5 dan revisi dokumen
	22–29	Finalisasi laporan dan seminar hasil

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

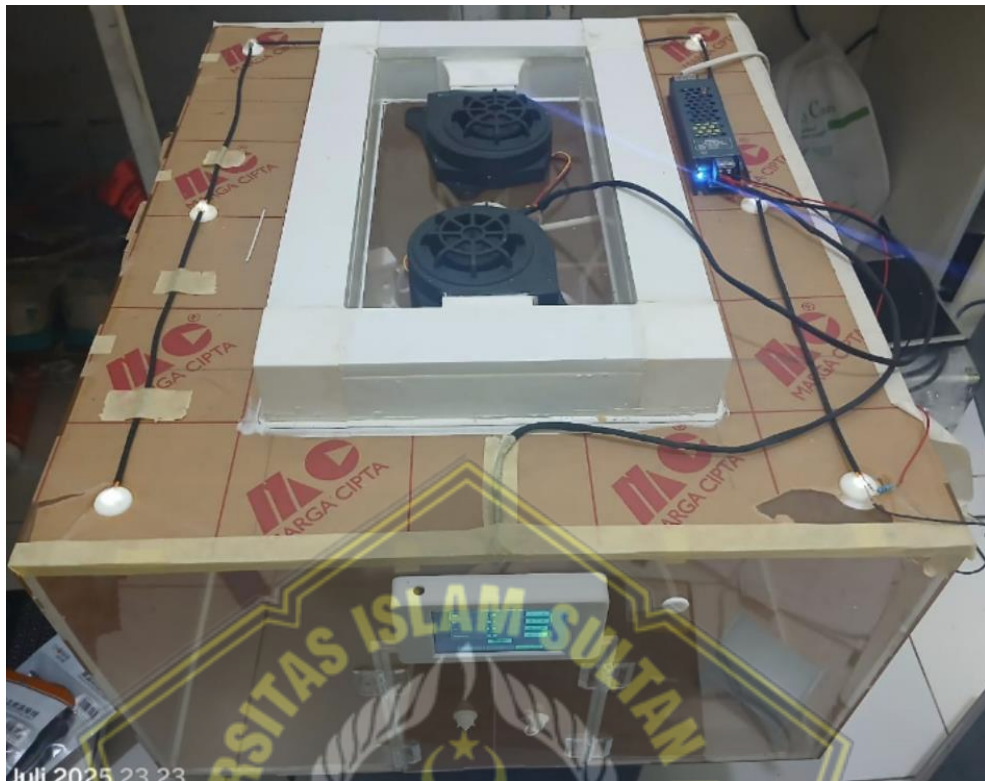
Bab ini memaparkan hasil penelitian serta analisis yang dilakukan untuk memperoleh data yang diperlukan dalam menjawab dan menyelesaikan setiap permasalahan yang telah dirumuskan.

4.1 Hasil Rancangan Perangkat Keras

Setelah perancangan perangkat keras selesai dibuat kemudian dilakukan pembuatan miniatur ruang operasi dengan bahan papan akrilik. Di dalam miniatur ruang operasi dilengkapi dengan miniatur alat kesehatannya juga. Selanjutnya dilakukan pemasangan rangkaian monitor dan kontrol ruang operasi pada bagian depan miniatur. Hasil perangkat keras tampak depan ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan hasil perangkat keras tampak atas ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.1 Hasil Perangkat Keras Tampak Depan



Gambar 4.2 Hasil Perangkat Keras Tampak Atas

Motor kipas diletakkan di bagian atas miniatur dan menyemburkan aliran udara ke arah bawah, mirip dengan kondisi ruang operasi yang sesungguhnya. Dibagian depan miniatur terdapat pintu yang dapat dibuka dan ditutup rapat untuk mengetes respon dari PID. Sensor suhu dan kelembaban diletakkan pada sisi dalam miniatur, sedangkan sensor tekanan diletakkan pada sisi dalam dan sisi luar miniatur. Untuk catu daya diletakkan pada bagian miniatur

4.2 Hasil Rancangan Antarmuka Pengguna Grafis

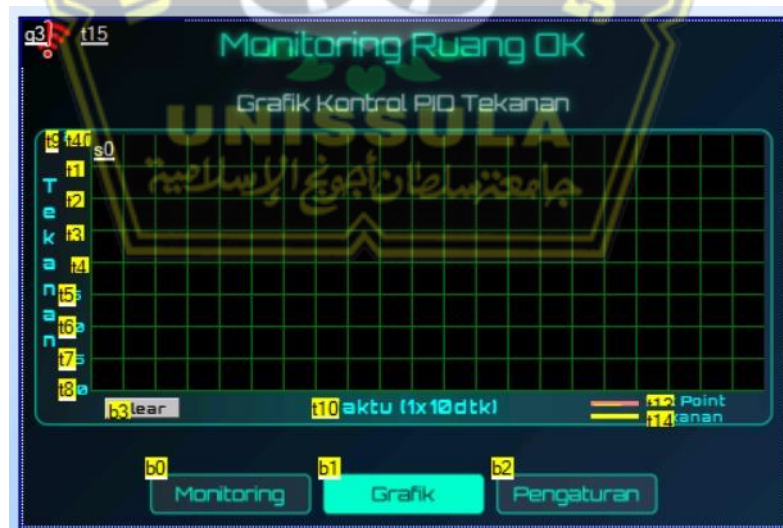
Antarmuka pengguna grafis dibuat menggunakan LCD *touch screen* 3,5 inch pada panel depan untuk menampilkan hasil pengukuran Monitoring Ruang Operasi. Program ini juga dilengkapi dengan tampilan kondisi suhu, kelembaban dan tekanan di dalam ruangan operasi. Grafik kontrol tekanan dengan metode PID juga 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 4.3 Tampilan Kondisi Suhu, Kelembaban dan Tekanan

Pada halaman monitoring, terdapat tampilan nilai pengukuran suhu, kelembaban dan tekanan, dilengkapi dengan status koneksi wifi, juga terdapat tampilan jam dan tanggal. Tampilan antar muka halaman monitoring terlihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.4 Tampilan Grafik Kontrol Tekanan dengan PID

Pada halaman grafik, menampilkan grafik respon PID, terlihat pada Gambar 4.4. Untuk garis warna merah muda menunjukkan set poin, sedangkan garis warna kuning menunjukkan grafik tekanan. Sedangkan tombol *Clear*

berfungsi untuk menghapus grafik. Kolom horizontal menunjukkan waktu, sedangkan kolom vertikal menunjukkan hasil tekanan terukur.

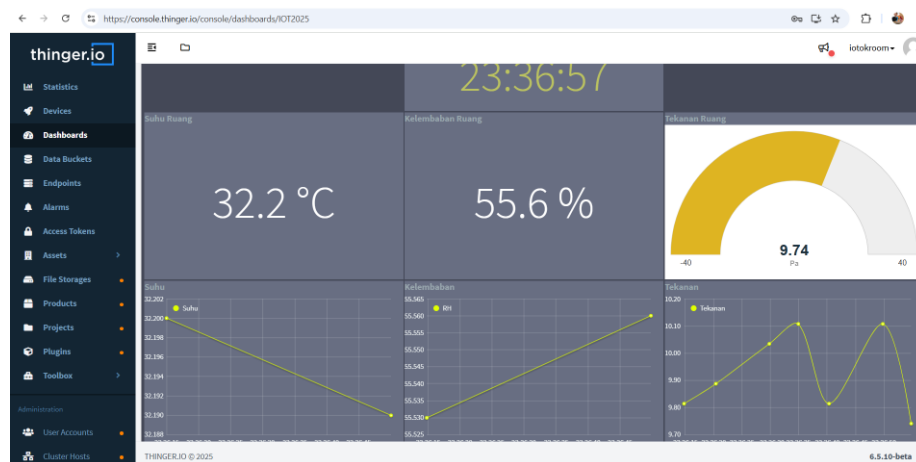


Gambar 4.5 Tampilan Pengaturan Nilai PID

Pada halaman pengaturan, seperti terlihat pada Gambar 4.5, terdapat pengaturan nilai K_p , K_i dan K_d . Tampilan ini juga dilengkapi dengan pengaturan *setpoint*. Sedangkan tombol simpan berfungsi utk menyimpan nilai pengaturan.

4.3 Tampilan Dashboard Thinger IO

Pada dashbord ini ditampilkan nilai dan grafik dari pengukuran suhu, kelembaban dan tekanan. Tampilan dashboard ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Tampilan Dasboard Thinger IO

Tampilan dashboard thinger IO seperti terlihat pada Gambar 4.6, memperlihatkan tampilan *real time* dari historis suhu, kelembaban dan tekanan udara dengan visualisasi berupa angka digital, gauge meter, dan grafik linier. Secara umum dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Navigasi Kiri (*Sidebar*)

Menu navigasi di sebelah kiri berisi fitur-fitur utama dari *Thinger.io* berupa :

- a. *Statistics*: Statistik perangkat dan data.
- b. *Devices*: Daftar perangkat yang terhubung ke *Thinger.io*.
- c. *Dashboards*: Halaman visualisasi seperti yang sedang ditampilkan.
- d. *Data Buckets, Endpoints, Alarms* : Untuk penyimpanan data, pemicu otomatisasi, dan pengaturan lainnya.
- e. *User Accounts, Cluster Hosts*: Untuk manajemen pengguna dan pengaturan server.

2. Jam Digital (Pojok Atas Tengah)

Menampilkan waktu saat ini secara *real time*.

3. Panel Indikator Utama

Tiga panel besar menampilkan kondisi udara ruang operasi secara *real time*:

- a. Suhu Ruang ($^{\circ}\text{C}$).
- b. Kelembaban Ruang (%).
- c. Tekanan Ruang (Pa).

4. Grafik Historis

Tiga grafik di bagian bawah menampilkan tren perubahan data:

- a. Suhu (Suhu terhadap Waktu), yaitu menunjukkan perubahan suhu.

- b. Kelembaban (RH terhadap Waktu), yaitu menunjukkan perubahan kelembaban.
- c. Tekanan (Tekanan terhadap Waktu), yaitu menunjukkan perubahan tekanan.

5. Header dan Akun

- a. Di kanan atas ada nama pengguna "iotokroom" yang sedang login.
- b. URL: <https://console.thinger.io/console/dashboards/IOT2025> menunjukkan dashboard ini adalah bagian dari proyek bernama IOT2025.

4.4 Kalibrasi Sensor-Sensor

Pada penelitian ini, proses kalibrasi dilakukan terhadap sensor tekanan, sensor suhu, dan sensor kelembaban dengan membandingkan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur standar, yaitu magnehelic gauge untuk tekanan, serta thermo-hygrometer untuk suhu dan kelembaban. Kalibrasi dilakukan di ruangan tertutup untuk meminimalkan gangguan lingkungan, seperti aliran udara, fluktuasi suhu, dan perubahan kelembaban yang tidak terkontrol. Kondisi ini diperlukan agar proses kalibrasi berlangsung stabil serta menghasilkan nilai pembacaan yang lebih akurat.

1. Kalibrasi Sensor Tekanan Menggunakan Magnehelic.

Magnehelic digunakan sebagai acuan karena mampu mengukur *differential pressure* secara akurat, stabil, dan tanpa memerlukan catu daya listrik. Proses kalibrasi dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

- a. Menghubungkan port magnehelic kesisi dalam *prototype* ruangan operasi.
- b. Mengatur variasi tekanan secara bertahap, yaitu: 5 Pa, 10 Pa, 15 dan 20 Pa.
- c. Mencatat nilai tekanan yang terbaca pada:

- 1) Sensor digital (LWLP5000-5XD)
 - 2) Magnehelic (sebagai alat referensi)
- d. Hasil kalibrasi tekanan selanjutnya dimasukkan dalam persamaan, sehingga menghasilkan nilai persentase *error* sebagai berikut :

$$\frac{5,2 - 5}{5,2} \times 100\% = 3,85\%$$

Untuk persentase akurasi, dihasilkan nilai sebagai berikut :

$$100\% - 3,85\% = 96,15\%$$

- e. Hasil kalibrasi tekanan selengkapannya, tersaji dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Kalibrasi Tekanan

Pengukuran ke	Pembacaan pada alat (Pa)	Alat Pembanding (Magnehelic)	Persentase Error	Akurasi
1	5,2	5	3,85%	96,15%
2	10	9,8	2,00%	98,00%
3	14,1	14	0,71%	99,29%
4	18,4	18	2,17%	97,83%
Rata-rata Akurasi				97,82%

2. Kalibrasi Sensor Suhu dan Kelembaban menggunakan Thermohygrometer.

Thermohygrometer digunakan sebagai alat acuan (*reference device*) untuk mengukur temperatur dan kelembaban relatif pada ruangan. Prosedur kalibrasi dilakukan dengan cara:

- a. Menempatkan sensor (SHT10) dan thermohygrometer pada lokasi yang sama agar menerima kondisi lingkungan yang identik.
- b. Membiarkan alat stabil minimal 5–10 menit untuk menghindari fluktuasi.
- c. Mengambil data pembacaan suhu dan kelembaban pada tiap 10 menit.

- d. Mencatat nilai dari pembacaan sensor suhu & kelembaban.
- e. Hasil kalibrasi suhu selanjutnya dimasukkan dalam persamaan, sehingga menghasilkan nilai persentase *error* sebagai berikut :

$$\frac{31,1 - 30,7}{31,1} \times 100\% = 1,29\%$$

Untuk persentase akurasi, dihasilkan nilai sebagai berikut :

$$100\% - 1,29\% = 98,71\%$$

- f. Hasil kalibrasi suhu selengkapnya, tersaji dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Kalibrasi Suhu

Pengukuran ke	Pembacaan pada alat (°C)	Alat Pemanding (ThermoHygro Meter)	Persentase Error	Akurasi
1	31,1	30,7	1,29%	98,71%
2	31	30,2	2,58%	97,42%
3	30,7	30	2,28%	97,72%
4	30,7	29,9	2,61%	97,39%
5	30,6	29,9	2,29%	97,71%
Rata-rata Akurasi				97,79%

- g. Sedangkan hasil kalibrasi kelembaban selanjutnya dimasukkan dalam persamaan, sehingga menghasilkan nilai persentase *error* sebagai berikut :

$$\frac{68,7 - 67,1}{68,7} \times 100\% = 2,38\%$$

Untuk persentase akurasi, dihasilkan nilai sebagai berikut :

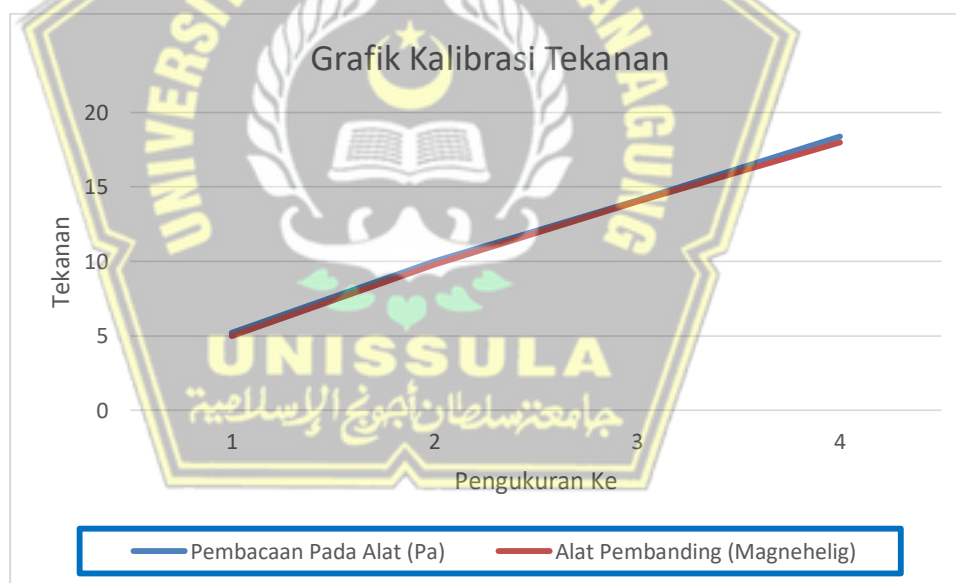
$$100\% - 2,38\% = 97,62\%$$

- h. Hasil kalibrasi kelembaban selengkapnya, tersaji dalam Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Kalibrasi Kelembaban

Pengukuran ke	Pembacaan pada alat (%RH)	Alat Pemanding (ThermoHygro Meter)	Persentase Error	Akurasi
1	67,1	68,7	2,38%	97,62%
2	65,5	66,5	1,53%	98,47%
3	64	65,7	2,66%	97,34%
4	64,8	66,6	2,78%	97,22%
5	66,1	67,7	2,42%	97,58%
Rata-rata Akurasi				97,65%

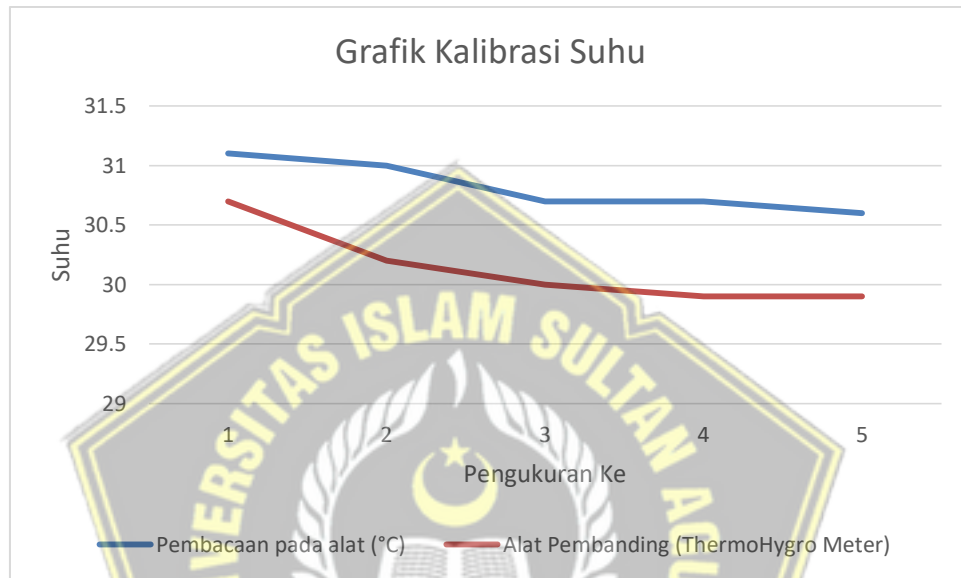
Dari hasil pengukuran dan perhitungan sensor-sensor dan alat pemanding, dapat dibuat grafik hasil kalibrasi sebagai berikut :



Gambar 4.7 Grafik Kalibrasi Tekanan

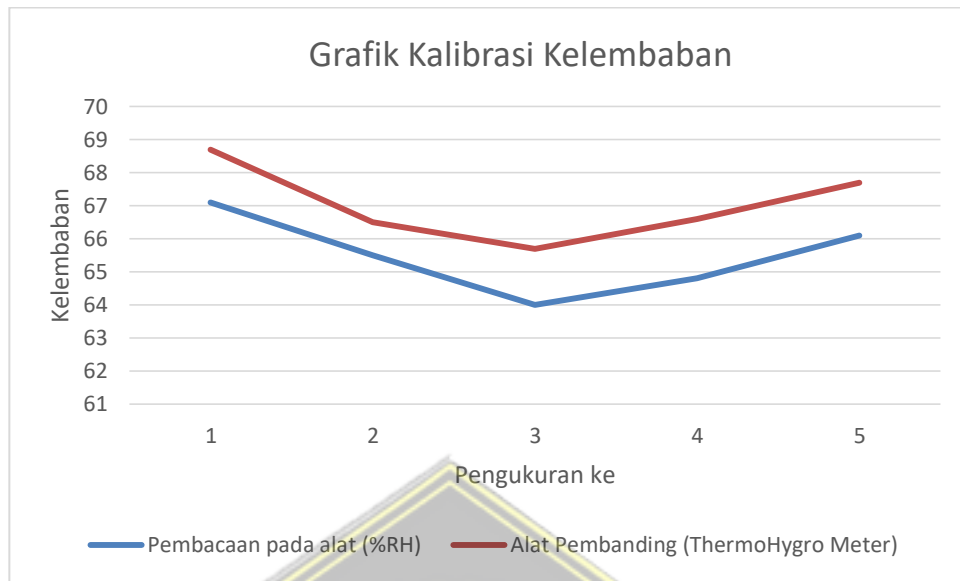
Dari Gambar 4.7 dapat dianalisis bahwa penunjukan tekanan pada alat *prototype* dan penunjukan kelembaban pada alat pemanding (Magnehelig) menunjukkan nilai yang mendekati sama. Dimana persentase akurasi, setelah dilakukan 4 kali pengambilan data pada nilai *setpoint* 5, 10, 15 dan 20, rata-rata sebesar 97,82 %. Ditunjukkan bahwa sensor mempunyai akurasi yang tinggi,

kerena pembacaannya sangat dekat dengan alat pembanding. Terjadinya *error* yang kecil, menunjukkan minimnya penyimpangan baik karena sistematis maupun lingkungan. Ditunjukkan pula nilai deviasi yang rendah, dikarenakan hasil antar pengukuran, konsisten dengan rentang *error* yang kecil.



Gambar 4.8 Hasil Kalibrasi Suhu

Dari Gambar 4.8 dapat dianalisis bahwa penunjukan suhu pada alat *prototype* dan penunjukan suhu pada alat pembanding (Thermohygrometer) menunjukkan nilai yang berbeda. Dimana persentase akurasi, setelah dilakukan 5 kali pengambilan data dalam rentang 10 menit, rata-rata sebesar 97,79 %. Persentase *error* yang kecil dan konsisten ini menunjukkan deviasi dan *repeatability* yang baik. Dari hasil kalibrasi dapat disimpulkan bahwa sensor yang digunakan sudah layak digunakan .



Gambar 4.9 Hasil Kalibrasi Kelembaban

Dari Gambar 4.9 dapat dianalisis bahwa penunjukan kelembaban pada alat *prototype* dan penunjukan kelembaban pada alat pembanding (Thermohygro Meter) menunjukkan nilai yang berbeda. Dimana persentase akurasi, setelah dilakukan 5 kali pengambilan data dalam rentang 10 menit, rata-rata sebesar 97,65%. Dari hasil kalibrasi dapat disimpulkan bahwa sensor kelembaban yang digunakan mempunyai performa yang baik, deviasi rendah menunjukkan stabilitas dan *repeatability* yang baik. Disimpulkan sensor sudah layak untuk digunakan.

4.5 Pengujian PID dan Output Kendali PID

Aspek yang sangat penting dalam kendali PID adalah penentuan parameter kontroler PID agar sistem memenuhi kriteria performa yang diinginkan. Sehingga dibutuhkan manual tuning dengan mengubah parameter K_p , K_i dan K_d . Disebut manual tuning dikarenakan dilakukan secara manual oleh manusia dengan cara menaikkan atau menurunkan nilai dan mengamati secara langsung respon dari sistem. Tuning pada PID bertujuan untuk menentukan parameter atau nilai dari kendali P, I, dan D. Proses manual tuning PID dilakukan dengan cara *trial and error* sampai mendapatkan hasil respon yang diinginkan. Proses tuning ini dapat mengoptimalkan sistem proses dan

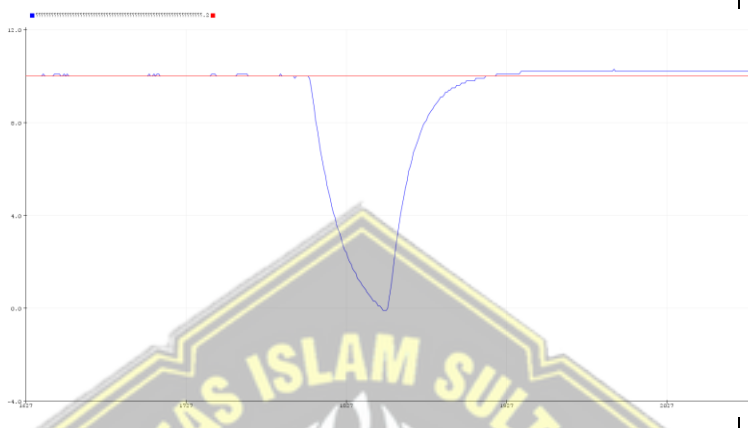

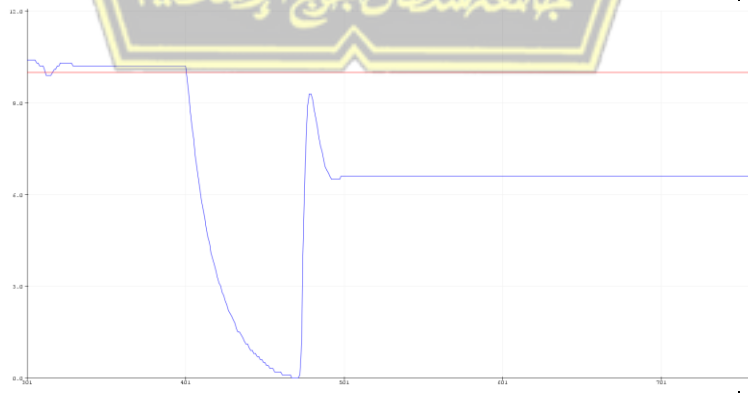
meminimalkan *error* antara variable proses dan *setpoint*.

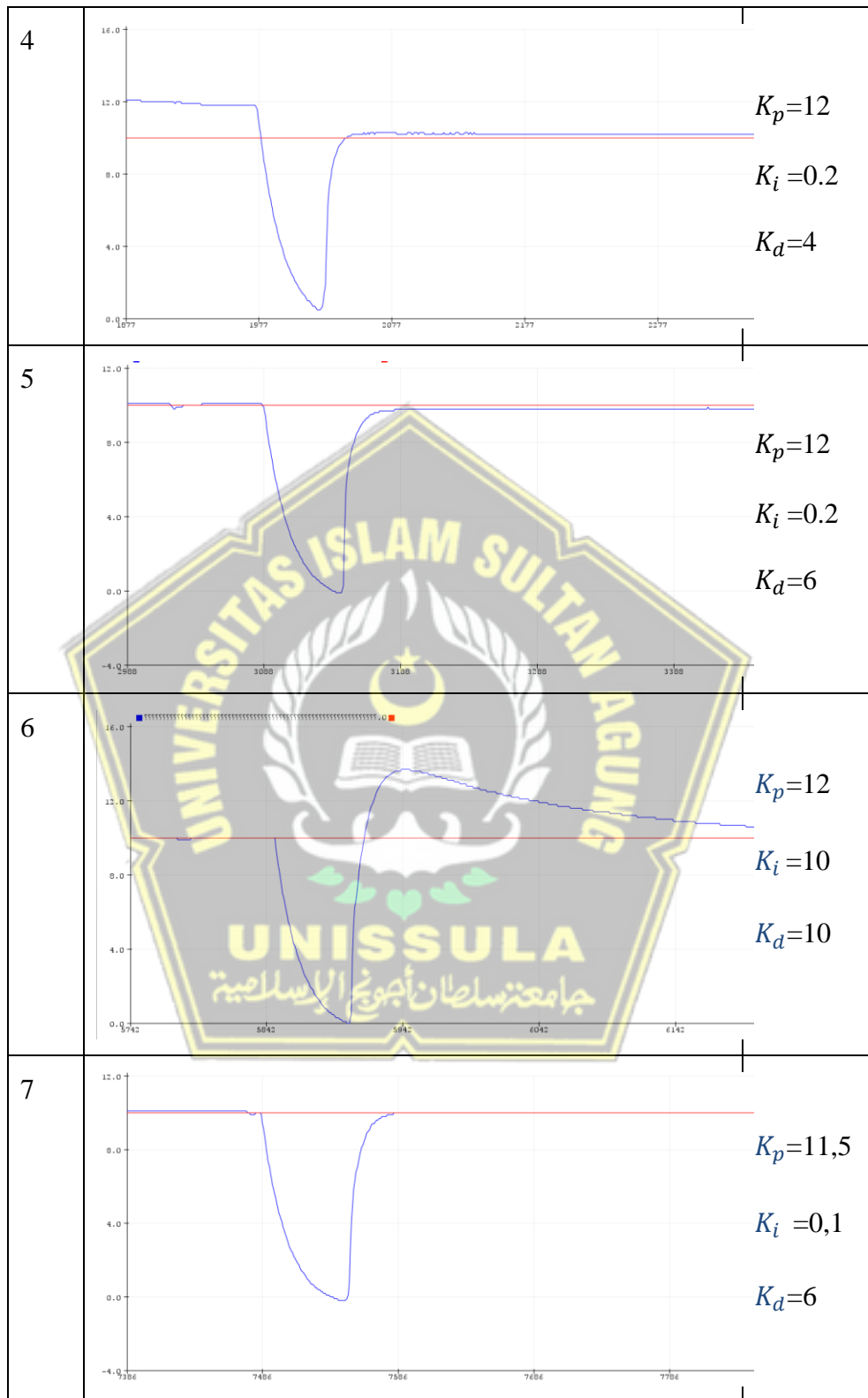
Cara paling efektif untuk menentukan parameter PID yang tepat adalah dengan melakukan pemodelan matematis terhadap sistem yang akan dikendalikan, sehingga nilai parameter dapat dihitung agar menghasilkan respons sesuai yang diharapkan. Namun, karena tidak semua sistem memiliki model matematis yang lengkap, proses tuning sering dilakukan secara eksperimental (*trial and error*) hingga diperoleh nilai yang optimal. Pada beberapa jenis proses, kondisi tanpa *overshoot* menjadi syarat penting, sehingga kestabilan sistem menjadi prioritas utama dan harus dicapai dalam waktu yang ditentukan.

Langkah awal yang dilakukan adalah mengatur K_i dan K_d menjadi nol. Kemudian nilai K_p ditingkatkan perlahan sampai mencapai osilasi. Apabila sudah muncul osilasi, maka nilai K_p diturunkan menjadi kira-kira setengah dari nilai tersebut. Kemudian K_i ditingkatkan sampai mencapai hasil yang lebih baik. Nilai K_i yang terlalu besar akan menyebabkan respon yang berlebihan dan *overshoot*. Tuning parameter diperlukan untuk mengoptimalkan kinerja dari kontroler PID. Kontroler PID tidak akan bekerja dengan baik atau hanya akan bekerja pada area kecil sekitar sistem *state* tertentu.

Dari langkah-langkah tersebut, selanjutnya akan didapatkan hasil berupa grafik respon PID yang tersaji dalam Tabel 4.4 :

Tabel 4.4 Grafik Respon dan Nilai PID

No	Grafik Respon	Nilai PID
1		$K_p = 1$ $K_i = 0$ $K_d = 0$
2		$K_p = 10$ $K_i = 0$ $K_d = 0$
3		$K_p = 20$ $K_i = 0$ $K_d = 0$



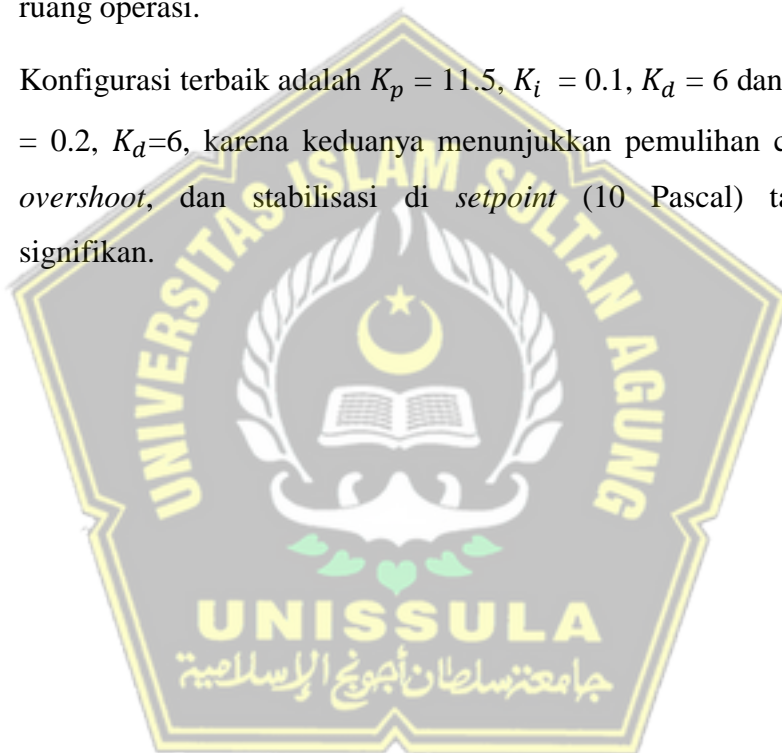
Dari kegiatan manual tuning yang hasilnya dapat diamati dalam bentuk grafik seperti terlihat pada Tabel 4.4, dapat diambil analisis berkaitan dengan konfigurasi PID dalam Tabel 4.5 sebagai berikut:

Tabel 4.5 Analisis Konfigurasi Parameter PID

No	K_p	K_i	K_d	Respon Sistem	Overshoot	Settling Time	Catatan
1	1	0	0	Respon sangat lambat, sistem tidak mencapai setpoint dengan baik.	Tidak ada	Lama	Tidak efektif, kontrol terlalu lemah.
2	10	0	0	Mulai merespon lebih cepat.	Ada	Sedang	Sistem mulai berosilasi di sekitar <i>setpoint</i> .
3	20	0	0	Respon lebih agresif dan cepat.	Tinggi	Lama	Terjadi osilasi besar, kontrol tidak stabil.
4	12	0.2	4	Respon mulai stabil, error steady-state berkurang.	Kecil	Lebih cepat	PID mulai menunjukkan perbaikan kontrol.
5	12	0.2	6	Respon lebih halus, osilasi menurun.	Kecil	Stabil	Respon semakin baik dengan redaman yang cukup.
6	12	10	10	Respon sangat lambat, terjadi overshoot besar, lambat kembali ke setpoint.	Besar	Lama	Ki terlalu tinggi menyebabkan sistem saturasi.
7	11.5	0.1	6	Respon paling stabil, cepat menuju setpoint, osilasi minim.	Hampir tidak ada	Paling cepat	Kombinasi terbaik dari semua percobaan.

Selanjutnya, dari hasil analisis konfigurasi parameter PID seperti tersaji pada Tabel 4.5, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Konfigurasi dengan *offset* besar ($K_p = 20$, $K_i = 0$, $K_d = 0$ dan $K_p = 1$, $K_i = 0$, $K_d = 0$) kurang optimal karena tidak mencapai *setpoint* dengan baik.
2. Konfigurasi dengan *overshoot* besar ($K_p = 12$, $K_i = 10$, $K_d = 10$) kurang ideal karena lonjakan tekanan dapat tidak diinginkan dalam ruang operasi.
3. Konfigurasi terbaik adalah $K_p = 11.5$, $K_i = 0.1$, $K_d = 6$ dan $K_p = 12$, $K_i = 0.2$, $K_d = 6$, karena keduanya menunjukkan pemulihan cepat, minim *overshoot*, dan stabilisasi di *setpoint* (10 Pascal) tanpa osilasi signifikan.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini, didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem monitoring udara berbasis IoT telah berhasil dirancang melalui pembuatan miniatur dengan input berupa sensor tekanan LWLP5000-5XD serta sensor suhu dan kelembapan SHT10 yang berfungsi membaca parameter udara di ruang operasi. Sensor yang digunakan mempunyai akurasi yang baik (sebesar 97,79 % untuk suhu, sebesar 97,65 % untuk kelembapan dan sebesar 97,82 % untuk tekanan), nilai *error* yang rendah, serta konsistensi pembacaan yang stabil. Untuk pemroses menggunakan mikrokontroler ESP32 yang berfungsi mengolah data dari sensor. Sedangkan output berupa data hasil pengukuran, dikirimkan melalui jaringan Wifi ke server, dimana *bandwidth* yang digunakan sebesar 7 sampai dengan 10 kbps mampu diakses pada jaringan intranet Rumah Sakit dan dapat diakses secara jarak jauh secara *real time*. Dengan implementasi IoT, kondisi udara di ruang operasi dapat dipantau secara kontinu, akurat, dan tidak harus diawasi langsung di lokasi.
2. Kendali PID terbukti mampu memberikan kendali yang baik untuk sistem ini dengan nilai $K_p = 11,5$, $K_i = 0,1$, dan $K_d = 6$. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kendali tersebut mampu menghasilkan respon dengan *overshoot* minimal, waktu pemulihan (*settling time*) yang cepat, serta mampu mengoreksi gangguan, seperti saat pintu ruang operasi dibuka tiba-tiba. Dengan penyesuaian nilai parameter PID, sistem dapat menjaga stabilitas dan mempertahankan tekanan udara tetap berada dalam rentang standar operasi medis setelah gangguan teratasi.
3. Sistem monitoring ini dilengkapi dengan dashboard web yang menampilkan data tekanan, suhu, dan kelembapan secara *realtime*. Tampilan yang disajikan berupa grafik historis perubahan tekanan dan

parameter lingkungan, status kendali PID, dan notifikasi bila tekanan berada di luar batas aman. Akses berbasis web memudahkan pihak rumah sakit untuk melakukan pemantauan dari berbagai perangkat (PC, laptop, *smartphone*) tanpa perlu instalasi khusus.



5.2 Saran

Adapun saran yang berkaitan dengan penelitian ini adalah :

1. Untuk mendapatkan nilai parameter K_p , K_i dan K_d yang diterapkan pada sistem yang lebih adaptif, beberapa metode tuning yang dapat digunakan antara lain: Ziegler–Nichols (manual tuning berdasarkan osilasi batas), Cohen–Coon (berdasarkan respon *step open loop*), *Relay Autotuning* (Åström–Hägglund) untuk memperoleh parameter secara otomatis, IMC/Skogestad berbasis pemodelan sistem, dan Optimasi berbasis algoritma seperti PSO atau *Genetic Algorithm* (GA) untuk mendapatkan parameter yang lebih optimal.
2. Menambahkan fitur keamanan data pada *platform web* untuk memastikan privasi dan integritas informasi.
3. Melakukan integrasi dengan sistem HVAC yang ada di ruang operasi, bukan hanya dengan motor kipas kecil, tapi langsung ke sistem AC atau ventilasi rumah sakit agar bisa mengontrol volume udara masuk dan keluar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Republic of Indonesia, “Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.79 Tahun 2014 Tentang Kebijakan Energi Nasional,” *Huk. Online*, pp. 1–60, 2014.
- [2] Widiyono, A. Aryani, and Suryani, *Kejadian Hipotermi Berdasarkan Lama Operasi Dan Suhu Ruangan*. 2023.
- [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 Kesehat. Direktorat Bina Pelayanan Penunjang Med. Dan Saranakesehatan*, p. 70, 2012.
- [6] 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/MagisterTeknikElektro_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),” *J. 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] S. Arttini and D. Prasetyowati, "Hybrid FLC-LMS Algorithm for Predicting Sediment Volume in the River," vol. 14, no. 2, pp. 395–409, 2021, doi: 10.22266/ijies2021.0430.36.
- [17] B. Arifin, A. A. Nugroho, E. N. Budisusila, and M. Khosyi, "System Identification and Control Strategy on Electric Power Steering DC Motor," vol. 5, no. 3, pp. 655–666, 2024, doi: 10.18196/jrc.v5i3.21614.
- [18] R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar, and S. N. Pawar, "A review of PID control, tuning methods and applications," *Int. J. Dyn. Control*, vol. 9, no. 2, pp. 818–827, 2021, doi: 10.1007/s40435-020-00665-4.
- [19] Fermion, *LWLP5000 DATA SHEET*. 2020.
- [20] 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.
- [21] Ilitek, “Datasheet LCD TFI,” vol. 320, no. 38, 2020.
- [22] M. K. Muhammad Nurhuda, “Perancangan Alat Uji Relay Thermal Trafo Tenaga Berbasis Arduino Mega 2560 dan Sensor Suhu Thermocouple Type K,” vol. 6, no. 10, 2024.
- [23] I. O. for S. (ISO), “Iso 7726,” *Ergon. Therm. Environ. — Instruments Meas. Phys. Quant.*, vol. 1998, 1998.
- [24] D. Instruments, “Differential Pressure,” *Magnehelic Gauge Press. Differ.*, pp. 1–5, 2000.

