



# PERANCANGAN SISTEM IOT UNTUK DETEKSI DAN MITIGASI KONDENSASI PADA PANEL SDP MELALUI PEMANTAUAN KELEMBAPAN DAN SUHU PERMUKAAN

Dalanta Riski Permana Tarigan<sup>1)</sup>, Aditya Chandra Hermawan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: [dalanta.22044@mhs.unesa.ac.id](mailto:dalanta.22044@mhs.unesa.ac.id)

<sup>2)</sup>Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: [adityahermawan@unesa.ac.id](mailto:adityahermawan@unesa.ac.id)

## Abstract

Condensation inside Sub Distribution Panels (SDPs) is one of the major causes of reduced electrical distribution system reliability, leading to corrosion, insulation degradation, and short circuits. This study proposes an Internet of Things (IoT)-based system for detecting and mitigating condensation risk by monitoring internal relative humidity (RH<sub>in</sub>) and panel surface temperature (T<sub>surface</sub>). The system employs an SHT31 sensor and a DS18B20 sensor for data acquisition, an ESP32 microcontroller as the main controller, and a Mamdani fuzzy logic algorithm to determine the operating level of a PTC heater. A blower is controlled using an interlocking strategy to ensure uniform heat distribution inside the panel. Sensor readings and actuator status are transmitted to an IoT platform for real-time monitoring and historical data logging. System evaluation includes sensor accuracy testing, fuzzy logic validation, actuator performance testing, and integrated system testing. The expected results demonstrate that the proposed system can detect potential condensation conditions at an early stage, provide adaptive control responses, and improve the reliability and operational safety of SDP panels through effective condensation mitigation.

**Keywords:** Internet of Things, Condensation, SDP Panel, Mamdani Fuzzy Logic, ESP32

## Abstrak

Kondensasi pada panel Sub Distribution Panel (SDP) merupakan salah satu penyebab utama penurunan keandalan sistem distribusi listrik karena dapat memicu korosi, penurunan resistansi isolasi, hingga hubungan singkat. Penelitian ini bertujuan merancang sistem Internet of Things (IoT) untuk mendeteksi dan memitigasi risiko kondensasi melalui pemantauan kelembapan relatif internal (RH<sub>in</sub>) dan suhu permukaan panel (T<sub>surface</sub>). Sistem menggunakan sensor SHT31 dan DS18B20 sebagai akuisisi data, mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali, serta menerapkan logika fuzzy Mamdani untuk menentukan tingkat operasi heater PTC secara bertahap. Blower dikendalikan menggunakan logika interlocking guna mendukung pemerataan distribusi panas di dalam panel. Data sensor dan status aktuator dikirimkan ke platform IoT untuk pemantauan secara real time dan pencatatan historis. Pengujian sistem meliputi akurasi sensor, validasi logika fuzzy, kinerja aktuator, serta integrasi sistem secara keseluruhan. Hasil yang diharapkan menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi kondisi yang berpotensi menimbulkan kondensasi secara dini, memberikan respons pengendalian yang adaptif, serta meningkatkan keandalan dan keselamatan operasional panel SDP melalui mitigasi kondensasi yang efektif.

**Kata Kunci:** Internet of Things, Kondensasi, Panel SDP, Logika Fuzzy Mamdani, ESP32



## PENDAHULUAN

Sub Distribution Panel (SDP) merupakan salah satu komponen penting dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik menuju beban. Keandalan operasional panel sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan di dalam kabinet, terutama pada daerah dengan kelembapan udara tinggi. Salah satu permasalahan yang sering terjadi adalah terbentuknya kondensasi akibat perbedaan suhu antara udara di dalam panel dan permukaan komponen. Fenomena ini menyebabkan uap air berubah menjadi cairan ketika suhu permukaan berada di bawah titik embun (dew point), sehingga meningkatkan risiko korosi pada busbar, menurunkan resistansi isolasi, serta berpotensi menimbulkan hubung singkat (short circuit) maupun flashover yang dapat mengganggu kontinuitas penyaluran energi listrik (Zhang et al., 2023; Murshed et al., 2022).

Deteksi dini terhadap risiko kondensasi memerlukan parameter yang mampu merepresentasikan kondisi aktual di dalam panel. Pengukuran suhu udara saja belum cukup karena proses kondensasi terjadi pada permukaan material yang memiliki karakteristik termal berbeda dengan udara di sekitarnya. Oleh sebab itu, suhu permukaan panel ( $T_{surface}$ ) menjadi parameter yang lebih representatif untuk mengidentifikasi potensi terbentuknya kondensasi. Selain itu, kelembapan relatif di dalam panel ( $RH_{in}$ ) berperan langsung dalam menentukan nilai titik embun. Peningkatan kelembapan relatif menyebabkan suhu titik embun semakin mendekati suhu permukaan sehingga peluang terbentuknya kondensasi menjadi lebih besar (Lawrence, 2022; Wang et al., 2024). Dengan demikian, analisis risiko kondensasi memerlukan pengamatan simultan terhadap  $RH_{in}$  dan  $T_{surface}$ .

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem pemantauan kondisi panel menggunakan sensor suhu maupun kelembapan. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pemantauan parameter lingkungan secara terpisah atau hanya melakukan monitoring tanpa mekanisme pengendalian adaptif terhadap kondisi yang berpotensi menimbulkan kondensasi. Pendekatan tersebut belum sepenuhnya mampu merepresentasikan kondisi aktual pembentukan embun yang terjadi pada permukaan panel maupun memberikan respons pengendalian yang sesuai terhadap perubahan kondisi lingkungan secara dinamis.

Karakteristik hubungan antara kelembapan relatif, suhu permukaan, dan risiko kondensasi bersifat nonlinier sehingga kurang sesuai apabila dikendalikan menggunakan metode berbasis ambang batas (threshold) konvensional. Salah satu metode yang mampu mengatasi kondisi tersebut adalah logika fuzzy Mamdani. Metode ini memungkinkan sistem menghasilkan keputusan pengendalian secara bertahap berdasarkan derajat keanggotaan setiap variabel masukan, sehingga respons yang dihasilkan menjadi lebih adaptif dibandingkan pengendalian on-off konvensional (Ansar et al., 2024). Penerapan logika fuzzy juga mendukung deteksi dini terhadap kondisi yang mendekati terbentuknya kondensasi sehingga tindakan mitigasi dapat dilakukan sebelum embun muncul pada permukaan panel.

Seiring berkembangnya teknologi Internet of Things (IoT), sistem pemantauan kondisi panel tidak lagi terbatas pada pengamatan lokal. Integrasi IoT memungkinkan data sensor dikirim secara real-time menuju platform cloud sehingga kondisi panel dapat dipantau dari jarak jauh, direkam sebagai data historis, serta dimanfaatkan untuk mendukung strategi predictive maintenance. Kemampuan tersebut memberikan nilai tambah dalam meningkatkan keandalan operasi sistem distribusi tenaga listrik sekaligus mempermudah proses pengawasan kondisi panel secara berkelanjutan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan perancangan sistem IoT untuk deteksi dan mitigasi risiko kondensasi pada panel SDP menggunakan dua parameter utama, yaitu kelembapan relatif internal ( $RH_{in}$ ) dan suhu permukaan panel ( $T_{surface}$ ). Sistem memanfaatkan sensor SHT31 dan DS18B20 sebagai akuisisi data, mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama, serta logika fuzzy Mamdani untuk menentukan tingkat daya pemanas (PTC heater) secara bertahap (discrete leveling). Blower dikendalikan menggunakan logika interlocking untuk mendukung pemerataan distribusi panas di dalam panel. Seluruh data hasil pengukuran maupun status aktuator dikirim ke platform IoT sehingga dapat dipantau secara real-time. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi pemantauan  $RH_{in}$  dan  $T_{surface}$  dengan pengendalian adaptif berbasis logika fuzzy Mamdani serta implementasi IoT sebagai sistem deteksi dini dan mitigasi kondensasi pada panel distribusi tegangan rendah.

## KAJIAN PUSTAKA

### 2.1 Kondensasi pada Panel Distribusi Tegangan Rendah

Sub Distribution Panel (SDP) merupakan panel distribusi tegangan rendah yang berfungsi menyalurkan energi listrik menuju beban sekaligus melindungi komponen kelistrikan dari gangguan lingkungan eksternal. Meskipun berada di dalam enclosure tertutup, panel SDP tetap rentan mengalami perubahan kondisi iklim mikro akibat fluktuasi suhu lingkungan. Perubahan tersebut dapat menyebabkan terbentuknya kondensasi ketika suhu permukaan panel ( $T_{surface}$ ) turun hingga mencapai atau berada di bawah suhu titik embun (dew point) udara di dalam panel. Kondensasi yang terjadi pada permukaan enclosure berpotensi menimbulkan tetesan air yang merambat menuju busbar, terminal, maupun perangkat proteksi sehingga meningkatkan risiko korosi, penurunan resistansi isolasi, tracking, flashover, dan hubung singkat yang dapat mengganggu keandalan sistem distribusi tenaga listrik (Murshed et al., 2022; Zhang et al., 2023).

### 2.2 Parameter Risiko Kondensasi

Risiko kondensasi dipengaruhi oleh interaksi antara kelembapan relatif internal ( $RH_{in}$ ) dan suhu permukaan panel ( $T_{surface}$ ). Peningkatan kelembapan relatif menyebabkan suhu titik embun semakin mendekati suhu permukaan sehingga peluang terbentuknya embun meningkat. Sebaliknya, apabila suhu permukaan dapat



dipertahankan berada di atas titik embun, proses kondensasi dapat dicegah. Oleh karena itu, pemantauan kedua parameter tersebut secara simultan menjadi pendekatan yang lebih representatif dibandingkan hanya mengukur suhu udara di dalam panel. Dalam penelitian ini, nilai RH<sub>in</sub> diperoleh menggunakan sensor SHT31, sedangkan T<sub>surface</sub> diukur menggunakan sensor DS18B20 sebagai dasar pengambilan keputusan sistem kendali.

### 2.3 Sistem Mitigasi Berbasis IoT

Internet of Things (IoT) memungkinkan proses akuisisi, transmisi, dan penyimpanan data sensor dilakukan secara real-time sehingga kondisi panel dapat dipantau dari jarak jauh. Pada penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai pengendali utama karena telah dilengkapi modul Wi-Fi terintegrasi sehingga mampu mengirimkan data sensor menuju platform cloud. Implementasi IoT tidak hanya berfungsi sebagai media pemantauan, tetapi juga menyediakan data historis yang dapat dimanfaatkan untuk evaluasi performa sistem dan mendukung penerapan predictive maintenance pada panel distribusi listrik.

### 2.4 Pengendalian Menggunakan Logika Fuzzy Mamdani

Hubungan antara kelembapan relatif, suhu permukaan, dan risiko kondensasi bersifat nonlinier sehingga kurang sesuai apabila dikendalikan menggunakan metode berbasis ambang batas (threshold). Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan logika fuzzy Mamdani sebagai metode pengambilan keputusan. Melalui proses fuzzifikasi, inferensi berbasis aturan IF-THEN, dan defuzzifikasi, sistem menghasilkan tingkat daya pemanas (PTC heater) secara bertahap (discrete leveling) sesuai kondisi panel. Selain itu, blower dikendalikan menggunakan logika interlocking untuk membantu pemerataan distribusi panas di dalam enclosure sehingga terbentuk kondisi iklim mikro yang lebih homogen. Pendekatan ini memungkinkan sistem memberikan respons yang lebih adaptif dibandingkan kontrol on-off konvensional.

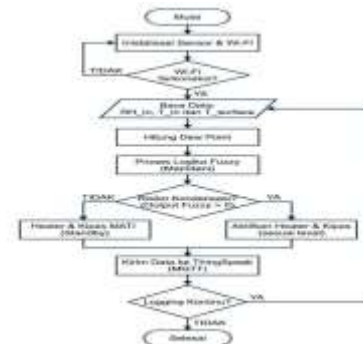
### 2.5 Posisi Penelitian

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem mitigasi kondensasi menggunakan sirkulasi udara, logika fuzzy, maupun pemantauan berbasis IoT. Zhang et al. (2023) menitikberatkan pada penggunaan konveksi paksa untuk menurunkan risiko kegagalan isolasi, Ansar et al. (2024) menerapkan logika fuzzy untuk pengendalian suhu dan kelembapan kabinet, sedangkan Wang et al. (2024) mengembangkan sistem anti-kondensasi berbasis IoT. Namun, penelitian-penelitian tersebut masih memiliki keterbatasan karena belum mengintegrasikan parameter RH<sub>in</sub> dan T<sub>surface</sub> sebagai indikator utama pembentukan kondensasi dengan sistem pengendalian adaptif berbasis logika fuzzy Mamdani. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan integrasi pemantauan RH<sub>in</sub> dan T<sub>surface</sub>, pengendalian bertingkat menggunakan PTC heater, mekanisme interlocking blower, serta pemantauan berbasis IoT sebagai strategi mitigasi kondensasi pada panel distribusi tegangan rendah.

## METODE PENELITIAN

### 3.1 Arsitektur Sistem

Penelitian ini mengembangkan sistem Internet of Things (IoT) untuk mitigasi kondensasi pada panel Sub Distribution Panel (SDP) menggunakan metode logika fuzzy Mamdani sebagai pengendali utama aktuator. Sistem dirancang untuk memantau kondisi lingkungan di dalam panel secara real-time dan melakukan tindakan mitigasi secara otomatis ketika terdeteksi kondisi yang berpotensi menimbulkan kondensasi.



Gambar 1 Flowchart Alur Kerja Sistem

Menurut Arsitektur sistem yang seperti flowchart yang diatas terdiri atas tiga subsistem utama, yaitu subsistem akuisisi data, subsistem pemrosesan, dan subsistem aktuator. Subsistem akuisisi data menggunakan sensor SHT31 untuk mengukur suhu udara internal (T<sub>in</sub>) dan kelembapan relatif (RH<sub>in</sub>), sedangkan sensor DS18B20 digunakan untuk mengukur suhu permukaan panel (T<sub>surface</sub>). Data hasil pengukuran sensor, keluaran fuzzy, dan status aktuator dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi menuju platform IoT sehingga kondisi panel dapat dipantau secara real-time.

### 3.2 Perancangan Perangkat Keras

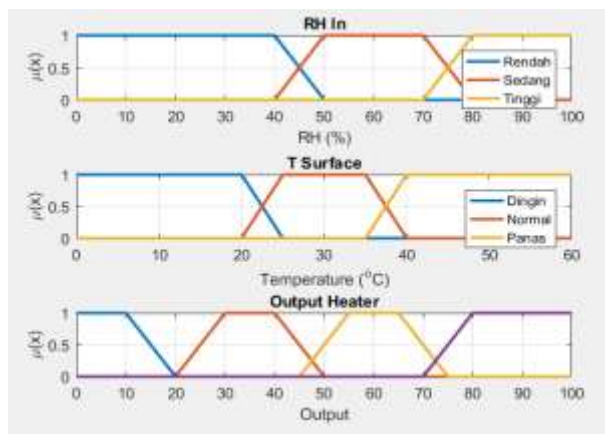
Perangkat keras sistem terdiri atas satu unit mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendalian, sensor SHT31, sensor DS18B20, modul relay dua kanal, heater PTC, kipas sirkulasi, serta catu daya. Sensor SHT31 dihubungkan ke ESP32 menggunakan komunikasi I<sup>2</sup>C, sedangkan sensor DS18B20 menggunakan protokol One-Wire. Modul relay berfungsi sebagai sakelar elektronik yang menghubungkan ESP32 dengan heater PTC dan kipas sehingga arus beban tidak langsung melewati mikrokontroler.

Pada sisi aktuator, heater PTC digunakan sebagai sumber pemanasan untuk meningkatkan suhu permukaan panel ketika potensi kondensasi meningkat. Kipas sirkulasi berfungsi mendistribusikan panas yang dihasilkan heater secara merata ke seluruh ruang panel sehingga tidak terjadi daerah dengan suhu rendah (cold spot). Untuk meningkatkan keselamatan sistem, jalur suplai heater dilengkapi sekering termal yang berfungsi memutus aliran listrik apabila terjadi kenaikan suhu melebihi batas operasi yang ditentukan.

### 3.3 Perancangan Sistem Kendali Logika Fuzzy



Metode pengendalian pada penelitian ini menggunakan Fuzzy Logic Mamdani karena mampu menangani hubungan nonlinier antara kelembapan dan suhu permukaan panel dalam menentukan tingkat risiko kondensasi, seperti yang saya jabarkan pada gambar grafik dibawah ini adalah menunjukkan diagram keanggotaan fuzzy Fungsi keanggotaan fuzzy digunakan untuk mengubah nilai masukan berupa kelembapan relatif internal panel (RH\_in) dan suhu permukaan panel (T\_Surface) menjadi variabel linguistik yang dapat diproses oleh sistem inferensi fuzzy Mamdani. Pada penelitian ini digunakan dua variabel masukan yaitu RH\_in dan T\_Surface, serta satu variabel keluaran berupa level kerja heater PTC.



**Gambar 2** Diagram grafik keanggotaan

Fuzzy Sistem fuzzy memiliki dua variabel masukan dan satu variabel keluaran, yaitu:

**Tabel 1** variabel himpunan fuzzy

| Variabel      | Himpunan Fuzzy         |
|---------------|------------------------|
| RHin (%)      | Rendah, Sedang, Tinggi |
| Tsurface (°C) | Dingin, Normal, Panas  |
| Output Heater | OFF, LOW, MEDIUM, HIGH |

Fungsi keanggotaan seluruh variable menggunakan bentuk trapesium dengan daerah overlap antarhimpunan untuk menghasilkan transisi keputusan yang lebih halus. Tahapan pengolahan data fuzzy terdiri atas proses fuzzifikasi, inferensi menggunakan metode Mamdani, agregasi menggunakan operator MAX, serta defuzzifikasi menggunakan metode Centroid sehingga menghasilkan nilai crisp sebagai dasar penentuan level operasi heater.

Diagram fungsi keanggotaan ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan parameter fungsi keanggotaan masing-masing variabel diperlihatkan pada Tabel 2.

**Tabel 2** parameter fungsi keanggotaan

| Variabel | Himpunan | Parameter |
|----------|----------|-----------|
|----------|----------|-----------|

|           |        |                 |
|-----------|--------|-----------------|
| RH_in     | Rendah | [0 0 40 50]     |
| RH_in     | Sedang | [40 50 70 80]   |
| RH_in     | Tinggi | [70 80 100 100] |
| T_surface | Dingin | [0 0 20 25]     |
| T_surface | Normal | [20 25 35 40]   |
| T_surface | Panas  | [35 40 60 60]   |

### 3.4 Rule Base dan Algoritma Kendali

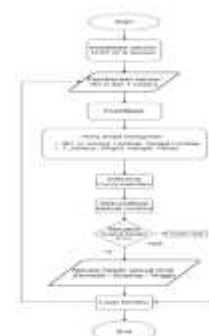
Keputusan pengendalian heater diperoleh melalui sembilan aturan (rule base) yang disusun berdasarkan kombinasi kelembapan relatif di dalam panel (RHin) dan suhu permukaan panel (Tsurface). Prinsip utama penyusunan aturan adalah semakin tinggi kelembapan relatif dan semakin rendah suhu permukaan panel, maka tingkat operasi heater akan semakin tinggi untuk menjaga suhu panel tetap berada di atas kondisi yang berpotensi menimbulkan kondensasi.

**Tabel 3** Aturan/rule base logika fuzzy

| No | RH In  | T Surface | Output Heater |
|----|--------|-----------|---------------|
| 1  | Rendah | Dingin    | Off           |
| 2  | Rendah | Normal    | OFF           |
| 3  | Rendah | Panas     | OFF           |
| 4  | Sedang | Dingin    | HIGH          |
| 5  | Sedang | Normal    | MEDIUM        |
| 6  | Sedang | Panas     | LOW           |
| 7  | Tinggi | Dingin    | HIGH          |
| 8  | Tinggi | Normal    | HIGH          |

Setelah proses inferensi selesai, nilai keluaran hasil defuzzifikasi dipetakan ke dalam empat level operasi heater. Selanjutnya, sistem menerapkan logika interlocking dengan mengaktifkan kipas sirkulasi ketika heater berada pada level selain OFF. Mekanisme ini bertujuan mempercepat distribusi panas sehingga seluruh permukaan panel memiliki suhu yang lebih seragam.

Flowchart algoritma kendali ditunjukkan pada Gambar 3.



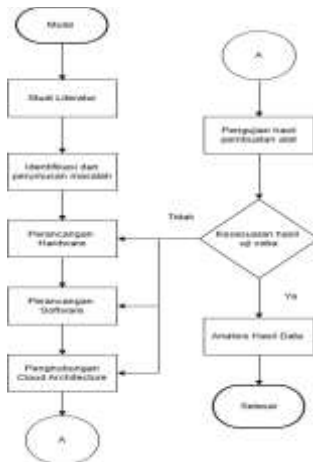
**Gambar 3** Flowchart algoritma kendali logika fuzzy





### 3.5 Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dari perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, dilanjutkan dengan implementasi algoritma logika fuzzy pada mikrokontroler ESP32, integrasi sistem IoT, serta pengujian kinerja sistem secara menyeluruh. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 4.



**Gambar 4** flowchart alur penelitian

### 3.6 Pengujian Sistem

Evaluasi sistem dilakukan untuk mengetahui kinerja setiap subsistem serta performa sistem secara keseluruhan. Pengujian terdiri atas empat tahapan sebagai berikut.

#### a. Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan untuk mengevaluasi akurasi pembacaan sensor SHT31 dan DS18B20 dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap alat ukur referensi. Parameter yang diamati meliputi suhu udara, kelembapan relatif, suhu permukaan panel, serta persentase kesalahan pengukuran.

#### b. Pengujian Logika Fuzzy

Pengujian logika fuzzy bertujuan memverifikasi kesesuaian keluaran sistem terhadap rule base yang telah dirancang. Pengujian dilakukan menggunakan berbagai kombinasi nilai RHin dan Tsurface, kemudian dibandingkan dengan hasil inferensi dan nilai crisp yang diperoleh dari proses defuzzifikasi.

#### c. Pengujian Aktuator

Pengujian aktuator dilakukan untuk memastikan heater PTC dan kipas bekerja sesuai keputusan yang dihasilkan sistem fuzzy. Parameter yang diamati meliputi status relay, perubahan suhu permukaan panel, serta perubahan kelembapan relatif setelah aktuator diaktifkan pada masing-masing level operasi.

#### d. Pengujian Integrasi Sistem

Pengujian integrasi dilakukan dengan mengoperasikan seluruh sistem pada beberapa skenario kondisi lingkungan. Evaluasi dilakukan

terhadap keberhasilan pembacaan sensor, proses inferensi fuzzy, pengendalian aktuator, serta pengiriman data menuju platform IoT. Kinerja sistem dinilai berdasarkan kemampuan melakukan mitigasi kondensasi secara otomatis dan konsistensi pengiriman data untuk kebutuhan pemantauan secara real-time.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pengujian Sensor

Bagian ini cukup membahas dua sensor.

#### a. Sensor SHT31

Tabel 4 menunjukkan hasil pengujian sensor SHT31 pada tiga kondisi kelembapan.

**Tabel 4** Hasil Pengujian sensor SHT 31

| NO | Keterangan kondisi | RHin (%)    | Keterangan                                                                                                 |
|----|--------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Kondisi rendah     | 27,9        | Toleransi yang didapatkan dari data pengujian dalam kondisi kategori kelembapan rendah sebesar $\pm 1,166$ |
|    |                    | 28,8        |                                                                                                            |
|    |                    | 31,2        |                                                                                                            |
|    |                    | 32,5        |                                                                                                            |
|    |                    | 33,8        |                                                                                                            |
|    |                    | 35,5        |                                                                                                            |
|    |                    | 36,9        |                                                                                                            |
|    |                    | 37,0        |                                                                                                            |
|    |                    | 37,0        |                                                                                                            |
|    |                    | 38,4        |                                                                                                            |
| 2. | Kondisi sedang     | 61,3        | Toleransi yang didapatkan dari data pengujian dalam kondisi kategori                                       |
|    |                    | 62,1        |                                                                                                            |
|    |                    | 63,2        |                                                                                                            |
|    |                    | 63,3        |                                                                                                            |
|    |                    | 63,6        |                                                                                                            |
|    |                    | <b>63,8</b> |                                                                                                            |

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor SHT31 mampu memberikan pembacaan kelembapan yang stabil pada seluruh rentang pengujian. Nilai rata-rata kelembapan yang diperoleh pada kondisi rendah, sedang, dan tinggi masing-masing sebesar 33,90%RH, 63,59%RH, dan 84,62%RH. Analisis statistik menunjukkan bahwa ketidakpastian pengukuran terbesar terjadi pada kondisi kelembapan rendah, sedangkan kondisi kelembapan sedang memiliki tingkat presisi terbaik dengan ketidakpastian diperluas sebesar  $\pm 0,76\%$  RH.

Berdasarkan spesifikasi pabrikan, sensor SHT31 memiliki akurasi  $\pm 2\%$  RH. Hasil pengujian menunjukkan bahwa performa sensor masih berada dalam rentang spesifikasi tersebut sehingga sensor dinilai layak digunakan sebagai masukan utama sistem logika fuzzy.



b. Sensor DS18B20

**Tabel 5** Hasil pengujian sensor DS18B20

| N<br>O | Keterangan<br>kondisi | suhu<br>permukaan(°C) | Suhu<br>Thermometer | Error<br>(Perbandingan<br>dengan<br>thermometer<br>asli) |
|--------|-----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|
| 1<br>. | Kondisi<br>dingin     | 19,4                  | 19,4                | 0                                                        |
|        |                       | 16,1                  | 16,9                | +0,8                                                     |
|        |                       | 15,2                  | 15,6                | +0,4                                                     |
|        |                       | 14,6                  | 14,0                | -0,6                                                     |
|        |                       | 14,6                  | 14,5                | -0,1                                                     |
|        |                       | 14,5                  | 14,1                | -0,4                                                     |
|        |                       | 14,4                  | 14,7                | +0,3                                                     |
|        |                       | 14,2                  | 14,5                | +0,3                                                     |
|        |                       | 13,8                  | 13,7                | -0,1                                                     |
|        |                       | 13,5                  | 13,8                | +0,3                                                     |
| 2<br>. | Kondisi<br>normal     | 37,1                  | 36,4                | -0,7                                                     |
|        |                       | 37,0                  | 36,3                | -0,7                                                     |
|        |                       | 36,4                  | 35,3                | -1,1                                                     |
|        |                       | 35,1                  | 34,4                | -0,7                                                     |
|        |                       | 34,6                  | 34,0                | -0,6                                                     |
|        |                       | 34,1                  | 33,4                | -0,7                                                     |
|        |                       | 33,7                  | 33,1                | -0,6                                                     |
|        |                       | 33,3                  | 32,8                | -0,5                                                     |
|        |                       | 32,3                  | 32,3                | 0                                                        |
|        |                       | 32,3                  | 32,1                | -0,2                                                     |
| 3<br>. | Kondisi<br>panas      | 50,2                  | 49,4                | -0,8                                                     |
|        |                       | 48,0                  | 49,0                | +1                                                       |

| N<br>O | Keterangan<br>kondisi | suhu<br>permukaan(°C) | Suhu<br>Thermometer | Error<br>(Perbandingan<br>dengan<br>thermometer<br>asli) |
|--------|-----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|
|        |                       | 47,6                  | 46,5                | -1,1                                                     |
|        |                       | 47,0                  | 48,2                | +1,2                                                     |
|        |                       | 47,0                  | 46,5                | -0,5                                                     |
|        |                       | 46,7                  | 46,4                | -0,3                                                     |
|        |                       | 46,6                  | 46,1                | -0,5                                                     |
|        |                       | 42,9                  | 43,3                | +0,4                                                     |
|        |                       | 42,2                  | 42,3                | +0,1                                                     |
|        |                       | 42,1                  | 42,7                | +0,6                                                     |

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor DS18B20 dilakukan untuk mengevaluasi akurasi pembacaan suhu permukaan dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap termometer suhu permukaan pada tiga kondisi, yaitu dingin, normal, dan panas. Setiap kondisi diuji menggunakan 10 sampel pengukuran. Hasil pengujian menunjukkan rentang kesalahan sebesar -0,6°C hingga +0,8°C pada kondisi dingin, -1,1°C hingga 0°C pada kondisi normal, dan -1,1°C hingga +1,2°C pada kondisi panas. Selain itu, nilai error sistematis yang diperoleh masing-masing sebesar 0,09°C, 0,58°C, dan 0,01°C, yang menunjukkan rata-rata penyimpangan pengukuran relatif kecil terhadap alat pembanding.

Secara keseluruhan, sensor DS18B20 memiliki nilai kesalahan maksimum  $\pm 1,2^\circ\text{C}$  dengan error sistematis yang rendah, sehingga dapat dikategorikan memiliki akurasi yang baik untuk pengukuran suhu permukaan pada sistem deteksi dan mitigasi kondensasi. Perbedaan hasil pengukuran dipengaruhi oleh toleransi akurasi sensor serta adanya jeda (delay) antara proses pembacaan sensor dan tampilan data pada sistem monitoring. Hasil ini mendukung penggunaan sensor DS18B20 sebagai masukan logika fuzzy dalam system yang dikembangkan.



## 4.2 Hasil Pengujian Logika Fuzzy

**Tabel 6** Hasil pengujian Logika fuzzy

| N<br>O | R<br>H_<br>in<br>(<br>%) | T_<br>Su<br>rf<br>a<br>c<br>e<br>(<br>°<br>C) | Kateg<br>ori<br>Rhin | Kate<br>go<br>ri<br>T_<br>sur<br>fa<br>ce | Outp<br>ut<br>bura<br>m<br>(Pem<br>an<br>as<br>Level<br>) | Ni<br>lai<br>cr<br>is<br>p<br>(Z<br>) |
|--------|--------------------------|-----------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 1.     | 34,5                     | 23,3                                          | Rendah               | Dingi<br>n                                | Off                                                       | 18,0                                  |
|        | 33,1                     | 23,3                                          |                      |                                           |                                                           | 18,0                                  |
|        | 33,1                     | 23,1                                          |                      |                                           |                                                           | 19,1                                  |
|        | 33,0                     | 23,0                                          |                      |                                           |                                                           | 19,4                                  |
|        | 32,0                     | 23,5                                          |                      |                                           |                                                           | 17,2                                  |
| 2.     | 39,5                     | 31,5                                          | Rendah               | Nor<br>ma<br>l                            | Off                                                       | 10                                    |
|        | 37,8                     | 31,5                                          |                      |                                           |                                                           | 10                                    |
|        | 36,0                     | 31,6                                          |                      |                                           |                                                           | 10                                    |
|        | 33,6                     | 31,7                                          |                      |                                           |                                                           | 10                                    |
|        | 32,0                     | 31,8                                          |                      |                                           |                                                           | 10                                    |
| 3.     | 30,4                     | 31,9                                          | Rendah               | Panas                                     | Off                                                       | 10                                    |
|        | 36,3                     | 42,7                                          |                      |                                           |                                                           | 10                                    |
|        | 36,3                     | 42,7                                          |                      |                                           |                                                           | 10                                    |
|        | 35,4                     | 45,8                                          |                      |                                           |                                                           | 10                                    |
|        | 34,3                     | 42,1                                          |                      |                                           |                                                           | 10                                    |
| 4      | 32,5                     | 40,7                                          | Sedang               | Dingi<br>n                                | m<br>ed<br>i<br>u<br>m                                    | 10                                    |
|        | 54,8                     | 22,8                                          |                      |                                           |                                                           | 69,7                                  |
|        | 52,7                     | 23,2                                          |                      |                                           |                                                           | 67,7                                  |
|        | 50,7                     | 23,2                                          |                      |                                           |                                                           | 67,7                                  |
|        | 48,4                     | 23,1                                          |                      |                                           |                                                           | 59,1                                  |
|        | 46,8                     | 22,9                                          |                      |                                           |                                                           | 53,6                                  |

|   |                  |                                           |        |           |      |                           |
|---|------------------|-------------------------------------------|--------|-----------|------|---------------------------|
| 5 | 67,3             | 29,3                                      | Sedang | Norm<br>a | Medi | 57,5                      |
|   | RH_<br>in<br>(%) | T_<br>S<br>u<br>rf<br>a<br>c<br>e<br>(°C) |        |           |      | Nilai<br>cris<br>p<br>(Z) |
|   | 65,7             | 29,3                                      |        |           |      | 57,5                      |
|   | 65,7             | 29,3                                      |        |           |      | 57,5                      |
|   | 65,4             | 29,0                                      |        |           |      | 57,5                      |
|   | 64,1             | 28,9                                      |        |           |      | 57,5                      |
|   | 52,8             | 51,1                                      |        |           |      | 33,6                      |
|   | 52,6             | 52,6                                      |        |           |      | 33,6                      |
|   | 52,5             | 54,1                                      |        |           |      | 33,6                      |
|   | 52,2             | 51,5                                      |        |           |      | 33,6                      |
|   | 52,0             | 47,0                                      |        |           |      | 33,6                      |
|   | 96,0             | 22,5                                      |        |           |      | 86,5                      |
|   | 95,9             | 22,8                                      |        |           |      | 86,6                      |
|   | 95,8             | 21,9                                      |        |           |      | 86,8                      |
|   | 95,8             | 22,2                                      |        |           |      | 86,6                      |
|   | 95,6             | 22,1                                      |        |           |      | 86,7                      |
|   | 90,4             | 35,0                                      |        |           |      | 87,6                      |
|   | 83,7             | 34,8                                      |        |           |      | 87,6                      |
|   | 80,6             | 36,0                                      |        |           |      | 80,1                      |
|   | 79,6             | 34,5                                      |        |           |      | 86,1                      |
|   | 77,1             | 34,6                                      |        |           |      | 77,5                      |
|   | 88,2             | 46,3                                      |        |           |      | 57,5                      |
|   | 87,0             | 45,3                                      |        |           |      | 57,5                      |
|   | 86,9             | 42,8                                      |        |           |      | 57,5                      |
|   | 85,5             | 44,4                                      |        |           |      | 57,5                      |



Pada tabel 6 Hasil pengujian logika fuzzy menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan keputusan level heater sesuai dengan kondisi masukan RH<sub>in</sub> dan T<sub>surface</sub>. Pada kondisi kelembapan rendah, sistem memberikan output heater off karena risiko kondensasi rendah sehingga aktuator tidak perlu bekerja untuk menghindari pemborosan energi dan risiko overheating. Pada kondisi kelembapan sedang, heater bekerja pada level low hingga medium sebagai tindakan preventif terhadap potensi pembentukan kondensasi. Sedangkan pada kondisi kelembapan tinggi dengan suhu permukaan rendah, sistem memberikan output high karena kondisi tersebut memiliki risiko kondensasi terbesar. Namun, ketika suhu permukaan tinggi, output heater diturunkan untuk mengurangi risiko panas berlebih. Hasil ini menunjukkan bahwa metode fuzzy Mamdani mampu memberikan respon adaptif berdasarkan kombinasi kelembapan dan suhu permukaan dalam menjaga kondisi panel SDP tetap aman.

#### 4.3 Hasil Pengujian Aktuator

**Tabel 7** Hasil pengujian Aktuator

| N<br>O | Kategori Pemas Level | Relat status Heater | Relat status kipas | P <sub>er</sub><br>u<br>ba<br>h<br>a<br>n<br>R<br>H<br>-<br>in | P <sub>e</sub><br>r<br>u<br>b<br>a<br>h<br>a<br>n<br>T<br>-<br>S<br>u<br>r<br>f<br>a<br>c<br>e | Keterangan                                                      |
|--------|----------------------|---------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1.     | Mati                 | Off                 | Off                | 39,5                                                           | 31,5                                                                                           | Kondisi panel aman, aktuator tidak aktif untuk menghemat energi |
|        |                      |                     |                    | 37,8                                                           | 31,5                                                                                           |                                                                 |
|        |                      |                     |                    | 36,0                                                           | 31,6                                                                                           |                                                                 |
|        |                      |                     |                    | 33,6                                                           | 31,7                                                                                           |                                                                 |
|        |                      |                     |                    | 32,0                                                           | 31,8                                                                                           |                                                                 |
| 2.     | Rendah               | On                  | On                 | 52,8                                                           | 51,1                                                                                           | Pemas                                                           |

| N<br>O | Kategori Pemas Level | Relat status Heater | Relat status kipas | P <sub>er</sub><br>u<br>b<br>a<br>h<br>a<br>n<br>RH <sub>in</sub> | P <sub>er</sub><br>u<br>b<br>a<br>h<br>a<br>n<br>T <sub>Surface</sub> | Keterangan                                                          |
|--------|----------------------|---------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
|        |                      |                     |                    | 52,6                                                              | 52,6                                                                  | an ringan berhasil menekan kelembapan awal                          |
|        |                      |                     |                    | 52,5                                                              | 54,1                                                                  |                                                                     |
|        |                      |                     |                    | 52,2                                                              | 51,5                                                                  |                                                                     |
|        |                      |                     |                    | 52,0                                                              | 47,0                                                                  |                                                                     |
| 3.     | Sedang               | On                  | On                 | 67,3                                                              | 29,3                                                                  | Dapat menekan dan menjaga zona transisi ke resiko yang lebih tinggi |
|        |                      |                     |                    | 65,7                                                              | 29,3                                                                  |                                                                     |
|        |                      |                     |                    | 65,7                                                              | 29,3                                                                  |                                                                     |
|        |                      |                     |                    | 65,4                                                              | 29,0                                                                  |                                                                     |
|        |                      |                     |                    | 64,1                                                              | 28,9                                                                  |                                                                     |
| 4.     | Tinggi               | On                  | On                 | 80,6                                                              | 36,0                                                                  | Respon cepat pada kondisi ekstrim untuk mencegah pengembunan        |
|        |                      |                     |                    | 79,6                                                              | 34,5                                                                  |                                                                     |
|        |                      |                     |                    | 77,1                                                              | 34,6                                                                  |                                                                     |
|        |                      |                     |                    | 67,3                                                              | 29,3                                                                  |                                                                     |
|        |                      |                     |                    | 65,7                                                              | 29,3                                                                  |                                                                     |





Pengujian aktuator dilakukan untuk mengetahui kemampuan heater PTC dan kipas dalam merespons keluaran sistem fuzzy Mamdani. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa keputusan kontrol yang dihasilkan berdasarkan nilai kelembapan dan suhu permukaan dapat diterapkan menjadi aksi nyata pada aktuator.

Pada kondisi aman, ketika nilai kelembapan dan suhu permukaan menunjukkan risiko kondensasi rendah, sistem memberikan keluaran heater OFF dan kipas OFF. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mengenali kondisi normal sehingga aktuator tidak bekerja secara terus-menerus. Dengan demikian, konsumsi energi dapat diminimalkan serta penggunaan komponen dapat lebih efisien.

Ketika terjadi peningkatan kelembapan atau penurunan suhu permukaan yang menyebabkan peningkatan risiko kondensasi, sistem fuzzy menghasilkan keluaran heater secara bertingkat mulai dari LOW hingga HIGH. Tingkatan keluaran tersebut menunjukkan bahwa sistem tidak menggunakan pendekatan kontrol langsung ON/OFF, tetapi menyesuaikan besar aksi mitigasi berdasarkan tingkat risiko yang terdeteksi.

Selain itu, kipas diaktifkan bersamaan dengan heater sebagai mekanisme interlocking untuk membantu proses distribusi panas di dalam panel. Kipas berfungsi menyebarkan udara hangat yang dihasilkan heater sehingga temperatur di dalam panel menjadi lebih merata dan mengurangi kemungkinan terbentuknya titik dengan suhu rendah yang dapat memicu kondensasi.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa aktuator mampu bekerja sesuai dengan keluaran sistem fuzzy dan memberikan respon mitigasi secara bertahap berdasarkan tingkat risiko kondensasi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu melakukan pengendalian yang adaptif dalam menjaga kondisi lingkungan panel SDP.

#### 4.4 Hasil Pengujian Integrasi sistem IoT

**Tabel 8** Hasil pengujian Integrasi sistem IoT

| N<br>O | sk<br>en<br>ari<br>o<br>ko<br>nd<br>isi | R<br>H<br>_i<br>n<br>(%<br>) | T_Su<br>r<br>fac<br>e<br>(°C<br>) | Pem<br>an<br>as<br>L<br>e<br>v<br>el | sta<br>tu<br>s<br>ki<br>pa<br>s | Da<br>ta<br>ter<br>kir<br>im<br>ke<br>clo<br>ud | Keter<br>a<br>nga<br>n  |
|--------|-----------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
| 1.     | Ko<br>n<br>d<br>is<br>i<br>K            | 96,0                         | 22,5                              | H<br>ig<br>h                         | On                              | S<br>u<br>k<br>s<br>e<br>s                      | Siste<br>m<br>mere<br>s |
|        |                                         | 95,9                         | 22,8                              |                                      |                                 |                                                 |                         |
|        |                                         | RH<br>_in<br>(%)             | T_S<br>ur                         |                                      |                                 |                                                 |                         |

|               |                      |                           |  |  |  |  |
|---------------|----------------------|---------------------------|--|--|--|--|
| ri<br>t<br>is | )                    | face<br>(°C)              |  |  |  |  |
|               | 95,<br>8             | 21,9                      |  |  |  |  |
|               | 95,<br>8             | 22,2                      |  |  |  |  |
|               | 95,<br>6             | 22,1                      |  |  |  |  |
|               | 67,<br>3             | 29,3                      |  |  |  |  |
|               | 65,<br>7             | 29,3                      |  |  |  |  |
|               | 65,<br>7             | 29,3                      |  |  |  |  |
|               | 65,<br>4             | 29,0                      |  |  |  |  |
|               | 64,<br>1             | 28,9                      |  |  |  |  |
|               | RH<br>_in<br>(%<br>) | T_S<br>ur<br>face<br>(°C) |  |  |  |  |
|               | 36,<br>3             | 42,7                      |  |  |  |  |
|               | 36,<br>3             | 42,7                      |  |  |  |  |
|               | 35,<br>4             | 45,8                      |  |  |  |  |
|               | 34,<br>3             | 42,1                      |  |  |  |  |
|               | 32,<br>5             | 40,7                      |  |  |  |  |
|               | 52,<br>8             | 51,1                      |  |  |  |  |
|               | 52,<br>6             | 52,6                      |  |  |  |  |
|               | 52,<br>5             | 54,1                      |  |  |  |  |
|               | 52,<br>2             | 51,5                      |  |  |  |  |
|               | 52,<br>0             | 47,0                      |  |  |  |  |

Pengujian integrasi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan seluruh subsistem bekerja secara terpadu, mulai dari proses pembacaan sensor, pengolahan data menggunakan metode fuzzy Mamdani, pengendalian aktuator, hingga pengiriman data monitoring melalui platform ThingSpeak. Pengujian dilakukan menggunakan beberapa kondisi lingkungan untuk mengetahui respon sistem terhadap perubahan tingkat risiko kondensasi.

Pada kondisi kritis, ketika kelembapan tinggi dan suhu permukaan panel rendah, sistem memberikan respon mitigasi dengan meningkatkan level heater dan



mengaktifkan kipas untuk membantu distribusi panas. Pada kondisitransisi, sistem menghasilkan keluaran heater tingkat menengah sebagai bentuk penyesuaian terhadap risiko kondensasi yang meningkat secara bertahap. Pada kondisi normal dan aman, sistem mempertahankan aktuatur dalam kondisi OFF karena parameter lingkungan masih berada dalam batas yang tidak berpotensi menyebabkan kondensasi.

Berdasarkan hasil pengujian integrasi, seluruh subsistem mampu bekerja secara terpadu. Data sensor, hasil keputusan fuzzy, serta status aktuatur berhasil dikirimkan menuju platform ThingSpeak secara real-time selama proses pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya mampu melakukan mitigasi kondensasi secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan panel, tetapi juga menyediakan fasilitas monitoring jarak jauh yang dapat mendukung proses pemeliharaan panel secara preventif.

#### 4.5 Pembahasan

Berdasarkan seluruh hasil pengujian, sistem yang dikembangkan mampu melakukan deteksi dini terhadap potensi kondensasi berdasarkan kombinasi kelembapan relatif dan suhu permukaan panel. Dibandingkan pendekatan berbasis threshold tetap, penggunaan logika fuzzy memungkinkan perubahan level heater berlangsung secara bertahap sehingga mengurangi fenomena switching yang berlebihan.

Selain itu, integrasi dengan platform IoT memungkinkan proses monitoring dilakukan secara real-time tanpa harus berada di lokasi panel. Hal ini meningkatkan efektivitas preventive maintenance karena kondisi panel dapat dipantau secara kontinu.

Walaupun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena pengujian dilakukan pada prototipe laboratorium sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi lingkungan industri yang memiliki variasi temperatur dan kelembapan yang lebih kompleks. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem dengan penambahan sensor lingkungan eksternal, prediksi titik embun yang lebih komprehensif, ataupun algoritma kecerdasan buatan sebagai pembanding metode fuzzy.

#### KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem Internet of Things (IoT) berbasis logika fuzzy Mamdani untuk mitigasi kondensasi pada panel Sub Distribution Panel (SDP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter kelembapan relatif (RHin) dan suhu permukaan (Tsurface) mampu digunakan sebagai indikator dalam mendeteksi potensi kondensasi. Implementasi logika fuzzy pada ESP32 berhasil menghasilkan keputusan tingkat operasi heater (OFF, LOW, MEDIUM, dan HIGH) secara adaptif sesuai dengan kondisi lingkungan. Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu memberikan respons yang tepat terhadap perubahan kelembapan dan suhu permukaan sehingga dapat menurunkan risiko kondensasi serta menjaga kondisi panel tetap berada pada zona operasi yang aman.

Selain itu, integrasi IoT menggunakan protokol MQTT dan platform ThingSpeak berhasil mendukung proses pemantauan kondisi panel secara real-time, di mana seluruh data sensor dan status aktuatur dapat dikirimkan ke cloud tanpa kegagalan selama pengujian. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan berpotensi diterapkan sebagai solusi preventive maintenance pada panel distribusi listrik. Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada penambahan sensor pada beberapa titik panel (multipoint sensing), analisis konsumsi energi sistem, serta pengembangan metode kendali yang lebih adaptif untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi sistem.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abdel Salam, M., Ali, A., & El Mohandes, M. (2020). Reliability analysis of low voltage distribution panels under humid environments. *International Journal of Power and Energy Systems*, 40(2), 155–166.
- Al Azzawi, A. J., Hasan, M. K., & Abdullah, R. (2023). Smart monitoring and control system for electrical enclosures using IoT technology. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 13(4), 3456–3465.
- ASHRAE. (2021). *ASHRAE Handbook—Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Espressif Systems. (2019). *ESP32 Series Technical Reference Manual*. Espressif Systems.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660.
- Hu, X., Zhang, Y., & Liu, H. (2021). Condensation risk analysis in electrical cabinets under humid environments. *IEEE Access*, 9, 112345–112356.
- IEC. (2020). *IEC 61439-1: Low-voltage Switchgear and Controlgear Assemblies—Part 1: General Rules*. International Electrotechnical Commission.
- Lawrence, M. G. (2021). The relationship between relative humidity and the dew point temperature in moist air. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(6), E1127–E1134.
- Lian, Z., & Zhao, Y. (2021). Anti-condensation control system for power distribution equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(4), 2331–2339.
- Mamdani, E. H. (1975). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the IEE*, 121(12), 1585–1588.
- MathWorks. (2023). *ThingSpeak Documentation*. MathWorks.
- Maxim Integrated. (2015). *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet*. Maxim Integrated.
- Sensirion AG. (2017). *SHT31 Humidity and Temperature Sensor Datasheet*. Sensirion AG.
- Suharjito, S., Nugroho, A., & Santoso, H. (2021). Implementasi Internet of Things untuk monitoring



- lingkungan berbasis MQTT. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 8(2), 215–222.
- Wang, L., Zhang, H., & Li, M. (2024). Fuzzy logic control for adaptive thermal management. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 32(2), 567–578.
- Wu, J., Liang, X., & Chen, Z. (2019). Dew point and condensation analysis. *Applied Thermal Engineering*, 148, 1091–1100.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.
- Zhang, X., Liu, Y., & Wang, Z. (2023). Relative humidity thresholds for insulation failure. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 30(4), 1234–1242.