

## SISTEM DETEKSI OKUPANSI RUANGAN MENGGUNAKAN SENSOR PIR DAN LOW RESOLUTION THERMAL CAMERA

Muhammad Naufal Daffawaliy<sup>1</sup>, Ayuanto Soetedjo<sup>2</sup>, I Komang Somawirata<sup>3</sup>

Teknik Elektro S1, ITN Malang, Malang Indonesia

<sup>1</sup>naufaldaffawaliy204@gmail.com, <sup>2</sup>aryuanto@lecturer.itn.ac.id, <sup>3</sup>kngsomawirata@lecturer.itn.ac.id

**Abstrak**— Bangunan modern memerlukan sistem deteksi okupansi yang efisien untuk mendukung konsep smart building. Namun, sistem berbasis kamera konvensional memiliki biaya instalasi tinggi serta berpotensi mengganggu privasi penghuni. Penelitian ini merancang sistem deteksi okupansi berbasis multisensor dengan menggabungkan sensor Passive Infrared (PIR) sebagai pendeteksi awal gerakan dan kamera termal AMG8833 beresolusi 8×8 piksel sebagai konfirmasi keberadaan manusia melalui parameter rata-rata suhu (average) dan standar deviasi. Penentuan arah pergerakan masuk dan keluar ruangan dilakukan menggunakan metode spatial binning, yaitu membagi citra termal menjadi empat zona horizontal dan menganalisis urutan aktivasi setiap zona secara real-time menggunakan mikrokontroler ESP32. Pengujian dilakukan pada variasi waktu, jenis pakaian, dan jarak objek dengan pengulangan sepuluh kali untuk setiap kondisi. Hasil menunjukkan bahwa ruangan kosong memiliki rata-rata suhu 23,6–25,1°C dengan standar deviasi sekitar 0,4, sedangkan ruangan berpenghuni meningkat menjadi 25,5–28,8°C dengan deviasi 1,1–2,1. Sistem berhasil mengklasifikasikan arah pergerakan dengan akurasi 87,5%, sementara kegagalan hanya terjadi pada jarak 10 cm akibat keterbatasan sudut pandang sensor AMG8833. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini efektif, hemat daya, dan tetap menjaga privasi pengguna.

**Kata Kunci:** Okupansi, Dual-Sensor, Sensor PIR, AMG8833, Spatial Binnings.

### I. PENDAHULUAN

#### A. Latar Belakang

Bangunan modern kini semakin menuntut efisiensi energi dan otomatisasi sistem yang cerdas untuk mendukung konsep smart building. Namun, di lapangan, sebagian besar sistem deteksi keberadaan manusia (occupancy detection) masih bergantung pada kamera CCTV yang memerlukan biaya instalasi tinggi, pemrosesan citra kompleks, dan berpotensi menimbulkan pelanggaran privasi penghuni. Selain itu, beberapa bangunan masih mengandalkan pendeteksi manual seperti pencatatan kehadiran atau penghitung mekanik di pintu masuk yang tidak mampu bekerja secara real-time dan rawan kesalahan[1][2]. Kondisi ini menunjukkan perlunya sistem deteksi okupansi yang otomatis, efisien, hemat daya, serta menjaga privasi, agar dapat diimplementasikan di berbagai

fasilitas seperti kantor, laboratorium, hingga rumah pintar (smart home)[3].

Sebagai solusi terhadap permasalahan tersebut, dikembangkan pendekatan berbasis sensor passive infrared (PIR) dan kamera termal beresolusi rendah yang mampu mendeteksi keberadaan manusia tanpa merekam identitas bisual. Sensor PIR bekerja dengan mendeteksi perubahan radiasi inframerah yang dihasilkan oleh tubuh manusia ketika bergerak melintasi area deteksi[4][5][6]. Sensor ini memiliki konsumsi daya rendah, harga terjangkau, dan keandalan tinggi dalam mendeteksi gerakan, tetapi tidak mampu mendeteksi objek diam dalam waktu lama. Sementara itu, kamera termal seperti AMG8833 dengan resolusi 8x8 piksel mampu menangkap distribusi suhu permukaan secara dua dimensi dan tetap berfungsi optimal meskipun dalam kondisi minimum cahaya[7][8][9]. Dengan menggabungkan kedua sensor ini, sistem dapat mendeteksi arah pergerakan manusia (masuk atau keluar ruangan) dan menghitung jumlah orang di dalam ruangan secara otomatis, real-time, dan tetap menjaga privasi pengguna[10].

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem deteksi okupansi dengan pendekatan berbeda. Penelitian [11] pada jurnal ini membahas efektivitas penggunaan sensor termal sebagai alat deteksi keramaian pada suatu gedung. Kajian tersebut menunjukkan bahwa teknologi kamera termal mampu mendeteksi tingkat kepadatan orang dengan akurasi tinggi hingga mencapai 99%, sebagaimana dilaporkan dalam studi literatur yang menggunakan kamera FLIR untuk pemantauan keramaian secara real-time. Selanjutnya, penelitian [12] pada JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasi) mengimplementasikan sensor AMG8833 dan sensor MLX90614 untuk mengukur suhu tubuh. Penelitian [13] pada MDPI Sensor (2025) memperkenalkan metode adaptive sliding window yang menyesuaikan sensitivitas sensor terhadap kecepatan pergerakan manusia, sehingga sistem dapat menghitung orang secara akurat dalam berbagai kondisi pencahayaan. Selain itu, penelitian [14] dalam jurnal sainteks (2023) membandingkan performa sensor AMG8833 dengan

kamera termal bersolusi rendah memiliki keterbatasan detail, sensor ini tetap efektif untuk mendeteksi arah pergerakan dengan konsumsi daya yang jauh lebih rendah.

Selain pendeteksi termal, beberapa penelitian menggunakan sensor PIR yang integrasikan dengan mikrokontroler ESP32. Penelitian [5] menunjukkan bahwa sensor PIR HC-SR501 dapat mendeteksi pergerakan manusia hingga jarak 7 meter dan mudah di integrasikan dengan modul ESP32-CAM untuk mengirim data secara nirkabel.

Berdasarkan hasil studi literatur dan kondisi di lapangan, sensor thermal AMG8833 memiliki keterlambatan dalam mengirim data/ interval data sensor dan digunakannya sensor ini adalah untuk menjaga privasi pengunjung. Pada penelitian [10] menunjukkan bahwa sistem deteksi okupansi berbasis sensor thermal berbiaya rendah ini memiliki potensi besar untuk diterapkan di smart building, dengan konsumsi daya rendah, mudah diintegrasikan secara nirkabel, dan mencapai akurasi lebih dari 90% dalam mendeteksi arah pergerakan manusia. Meski demikian, performannya menurun pada suhu lingkungan tinggi dan pergerakan cepat. Untuk meningkatkan akurasi dan kestabilan sistem, penelitian ini mengusulkan pendekatan multi-sensor dengan menggabungkan sensor PIR sebagai pendeteksi gerakan dan sensor AMG8833 sebagai pendeteksi distribusi suhu tubuh manusia. Keduanya dihubungkan ke mikrokontroler ESP32 agar data dapat diproses dan dikirim secara real-time dengan interval pembacaan 1 detik. Sistem ini diharapkan mampu mendeteksi arah dan jumlah okupansi yang lebih akurat, efisien, ekonomis, serta tetap menjaga privasi pengunjung sebagai alternatif sistem berbasis kamera konvensional.

## B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara merancang sistem deteksi okupansi yang dapat menjaga keamanan dan privasi pengguna.
2. Bagaimana cara merancang dan mengimplementasikan sistem deteksi okupansi dengan multi-sensor
3. Perbandingan antara sensor PIR dan Thermal Camera 8x8 Pixel (AMG8833)

## C. Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan sistem deteksi okupansi ruangan yang menjaga privasi dan menggunakan multi-sensor, sensor PIR dan kamera thermal 8x8 piksel.

# II. KAJIAN PUSTAKA

## A. Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas sistem deteksi okupansi ruangan menggunakan sensor termal beresolusi rendah dan sensor PIR dengan pendekatan yang berbeda-beda. Penelitian [7] mengembangkan sistem real-time occupancy detection menggunakan sensor termal low-resolution berbasis thermopile array yang ditempatkan pada area pintu. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sensor

termal mampu mendeteksi keberadaan manusia dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi ketika objek melintas, namun sistem masih sangat bergantung pada kontras suhu antara tubuh manusia dan lingkungan sekitar.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Perra et al. [10] memanfaatkan sensor inframerah berbiaya rendah yang dipasang di area pintu untuk memonitor kehadiran manusia di dalam gedung. Penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan berbasis sensor termal low-cost dapat digunakan sebagai alternatif sistem berbasis kamera konvensional, terutama karena sifatnya yang menjaga privasi. Namun demikian, penelitian tersebut masih berfokus pada pendeteksian keberadaan dan belum secara spesifik membahas ketahanan sistem terhadap kondisi lingkungan dengan suhu tinggi atau pergerakan manusia yang cepat.

Pada penelitian [13], diperkenalkan metode adaptive sliding window untuk meningkatkan sensitivitas sensor termal terhadap kecepatan pergerakan manusia. Metode ini mampu menyesuaikan parameter deteksi berdasarkan pola pergerakan objek, sehingga meningkatkan akurasi penghitungan orang. Meskipun demikian, pendekatan ini masih berfokus pada pengolahan data sensor termal saja dan belum mengombinasikannya dengan sensor lain sebagai validasi tambahan.

Selain sensor termal, beberapa penelitian juga memanfaatkan sensor PIR sebagai pendeteksi gerakan. Penelitian [5] menunjukkan bahwa sensor PIR HC-SR501 yang diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 dapat mendeteksi pergerakan manusia hingga jarak sekitar 7 meter dan mudah diimplementasikan dalam sistem IoT. Akan tetapi, sensor PIR memiliki keterbatasan utama, yaitu hanya mampu mendeteksi perubahan radiasi inframerah akibat pergerakan dan tidak dapat mendeteksi keberadaan manusia yang berada dalam kondisi diam dalam waktu lama.

Berdasarkan kajian penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa masing-masing sensor memiliki kelebihan dan keterbatasan. Sensor termal efektif dalam mendeteksi distribusi suhu tubuh manusia, sedangkan sensor PIR unggul dalam mendeteksi pergerakan. Namun, penggunaan sensor secara tunggal masih menimbulkan permasalahan akurasi dalam kondisi tertentu. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan multi-sensor yang mengombinasikan sensor PIR dan kamera termal beresolusi rendah untuk saling melengkapi kekurangan masing-masing sensor, sehingga sistem deteksi okupansi dapat bekerja lebih stabil dan andal.

Pada survey lapangan yang dilakukan pada sistem deteksi okupansi menggunakan sensor PIR, ditemukan bahwa sensor PIR dapat mendeteksi pergerakan manusia dengan baik saat terjadi gerakan dinamis, seperti seseorang berjalan melintasi area sensor. Namun, ketika objek diam terlalu lama di dalam ruangan atau dalam posisi statis, sensor PIR gagal memberikan sinyal deteksi lanjutan, sehingga secara otomatis menganggap ruangan kosong.

## B. Occupancy

Okupansi (tingkat hunian) merujuk pada status keberadaan dan jumlah orang yang menghuni suatu area atau ruang pada waktu tertentu. Dalam konteks sistem deteksi, tujuan utamanya

adalah untuk mengidentifikasi apakah sebuah ruangan berada dalam status kosong atau dihuni (berisi 1 orang, 2 orang, dst.). Pemahaman yang akurat mengenai okupansi adalah dasar utama bagi sistem otomatisasi bangunan, terutama untuk menghemat energi dengan mengontrol pencahayaan, pemanas, dan pendingin udara agar hanya beroperasi sesuai dengan kebutuhan penghuni.

### C. Deviasi

Deviasi atau standard deviation adalah ukuran yang menunjukkan seberapa jauh data menyebar dari nilai rata-ratanya. Deviasi penting dalam sistem sensor karena dapat menunjukkan apakah pembacaan yang muncul konsisten (valid) atau terdapat anomali/noise.

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

### D. Average

Rata-rata atau mean merupakan salah satu ukuran pemusatan data yang digunakan untuk mewakili nilai tengah dari sekumpulan data. Rata-rata banyak digunakan pada sistem sensor, analisis data lingkungan, statistik pengukuran, dan pengolahan sinyal untuk memperoleh nilai representatif dari sekumpulan pengamatan.

$$Average = \frac{\sum x}{n} \quad (2)$$

### E. Spatial Binnings

Pada penelitian ini, metode spatial binning diterapkan dengan membagi frame thermal 8x8 piksel menjadi empat zona horizontal (bin) yang masing-masing terdiri dari 2x8 piksel. Pembagian ini bertujuan untuk mereduksi kompleksitas data dari 64 titik data menjadi 4 wilayah analisis yang lebih terstruktur.

Sistem mendeteksi arah pergerakan dengan menganalisis sequence aktivasi bins. Pola [1,2,3,4] mengindikasikan pergerakan dari kiri ke kanan (masuk), sedangkan pola [4,3,2,1] merepresentasikan pergerakan dari kanan ke kiri (keluar). Implementasi FIFO buffer memastikan proses analisis frame berjalan secara real-time.

### F. Multi-Sensor

Konsep Multi-Sensor melibatkan penggunaan dua atau lebih jenis sensor yang berbeda secara bersamaan untuk mendeteksi fenomena yang sama, dengan tujuan utama meningkatkan akurasi dan keandalan sistem secara keseluruhan. Dalam kasus ini, fusi data dari sensor PIR (yang kuat mendeteksi gerakan) dan sensor termal AMG8833 (yang kuat mendeteksi panas tubuh) digunakan untuk saling melengkapi. Dengan menggabungkan kedua sumber informasi, kelemahan satu sensor (misalnya, kegagalan PIR mendeteksi orang diam) dapat ditutupi oleh keunggulan sensor lainnya, menghasilkan keputusan deteksi okupansi yang lebih kuat.

### G. Sensor PIR



Gambar 1. Sensor PIR

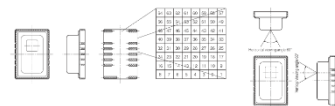
Pada gambar 1, Sensor PIR yang digunakan pada sistem ini memiliki rentang tegangan masukan yang luas, yaitu antara 4,5 hingga 12 volt dengan tegangan kerja yang direkomendasikan sebesar +5 volt. Sensor ini menghasilkan tegangan keluaran logika tinggi atau rendah (3,3V TTL) sesuai dengan kondisi deteksi gerakan di sekitarnya. Salah satu keunggulannya adalah kemampuannya untuk membedakan antara gerakan objek dan gerakan manusia, sehingga hasil deteksi menjadi lebih akurat. Dengan sudut deteksi hingga 120° dan jangkauan sekitar 7 meter, sensor ini mampu memantau area yang cukup luas. Selain itu, konsumsi dayanya sangat rendah, hanya sekitar 65 mA, dan dapat beroperasi dengan baik pada suhu lingkungan antara -20°C hingga +80°C, menjadikannya andal untuk berbagai kondisi penggunaan.

### H. Thermal Camera Low-Resolution(AMG8833)



Gambar 2. Sensor AMG8833

Pada gambar 2, Sensor termal AMG8833 Grid-EYE merupakan sensor array inframerah berbasis 8x8 piksel yang mampu mendeteksi suhu permukaan objek secara dua dimensi dengan akurasi ±2,5°C. Bekerja pada tegangan 3,3V DC, sensor ini memiliki jarak deteksi manusia hingga 7 meter dengan sudut pandang horizontal dan vertikal sebesar 60°, sehingga mencakup area yang luas. Melalui komunikasi I2C dan frame rate 1–10 fps, perangkat ini mampu menyajikan data suhu secara real-time dengan konsumsi daya yang sangat rendah, yaitu sekitar 4,5 mA. Keunggulan utamanya terletak pada kemampuan mendeteksi panas tubuh tanpa menampilkan citra visual, menjadikannya solusi ideal untuk sistem deteksi okupansi yang tetap menjaga privasi pengguna.



Gambar 3. Pixel array & viewing field

Pada gambar 3, Sensor termal AMG8833 Grid-EYE memiliki konfigurasi array 8x8 yang terdiri dari 64 titik pengukuran suhu mandiri untuk mendeteksi radiasi inframerah secara dua dimensi. Setiap piksel pada sensor ini mampu merepresentasikan nilai suhu permukaan dalam derajat Celsius yang dapat diakses secara digital melalui antarmuka I2C. Dengan sudut pandang horizontal dan vertikal sebesar 60°, sensor ini memiliki cakupan area pemantauan yang luas untuk menghasilkan peta distribusi suhu dari objek atau manusia.

Kemampuan dalam membentuk pemetaan termal dua dimensi ini menjadikan AMG8833 sangat efektif untuk aplikasi pendeteksi keberadaan serta sistem penghitung orang berbasis sensor termal.

Parameter penentuan okupansi:

Tabel 1. Parameter Okupansi

| No | Avg(1,1-2,1) | Dev(25,8-28,8) | PIR(1)  | Input Benar | Status    |
|----|--------------|----------------|---------|-------------|-----------|
| 1  | Invalid      | Invalid        | Invalid | 0           | Kosong    |
| 2  | Invalid      | Invalid        | Valid   | 1           | Kosong    |
| 3  | Invalid      | Valid          | Invalid | 1           | Kosong    |
| 4  | Valid        | Invalid        | Invalid | 1           | Kosong    |
| 5  | Invalid      | Valid          | Valid   | 2           | Ada Orang |
| 6  | Valid        | Invalid        | Valid   | 2           | Ada Orang |
| 7  | Valid        | Valid          | Invalid | 2           | Ada Orang |
| 8  | Valid        | Valid          | Valid   | 3           | Ada Orang |

#### I. Box X-3



Gambar 4. Box X-3

Pada gambar 4, Alat ini menggunakan Box X-1 berukuran 10 cm × 7,5 cm × 3,5 cm yang berfungsi sebagai wadah pelindung (enclosure) utama bagi komponen sistem seperti ESP32, sensor PIR, dan sensor AMG8833. Penggunaan material plastik ABS berkualitas tinggi memberikan ketahanan mekanik yang baik namun tetap ringan, sehingga memudahkan proses instalasi pada dinding atau area pintu. Selain melindungi rangkaian dari debu dan benturan, ukurannya yang kompak memastikan tampilan perangkat IoT tetap rapi, aman, dan efisien untuk aplikasi berskala kecil.

#### J. ESP32



Gambar 5. ESP32

Gambar 5, ESP32 Dev Board berfungsi sebagai pusat kendali utama dalam sistem deteksi okupansi berbasis multi-sensor berkat mikrokontroler dual-core 32-bit serta dukungan konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth yang dimilikinya. Modul ini menawarkan fleksibilitas tinggi melalui berbagai pin GPIO yang mendukung antarmuka komunikasi seperti ADC, DAC,

PWM, SPI, I2C, dan UART, sehingga mampu mengintegrasikan sensor PIR dan AMG8833 secara bersamaan. Dengan rentang tegangan kerja 3,3V hingga 5V, board ini sangat kompatibel dengan mayoritas sensor IoT. Keunggulan dalam kecepatan pemrosesan data dan kemampuan transmisi nirkabel menjadikannya solusi ideal untuk menjalankan sistem pendeteksi okupansi secara real-time.

#### K. Arduino IDE



Gambar 6. Arduino IDE

Gambar 6, Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) merupakan perangkat lunak berbasis *open source* yang berfungsi untuk menulis, mengedit, dan mengunggah kode ke papan mikrokontroler seperti ESP32. Menggunakan bahasa pemrograman berbasis C/C++, platform ini menyediakan berbagai pustaka (*library*) bawaan yang memudahkan kontrol sensor maupun komunikasi serial. Fleksibilitasnya memungkinkan pengguna mengembangkan berbagai proyek dari otomatisasi sederhana hingga aplikasi *Internet of Things* (IoT) dengan dukungan komunitas dan dokumentasi yang luas. Melalui koneksi USB, proses pengembangan perangkat keras menjadi lebih cepat dan efisien bagi para pengembang.

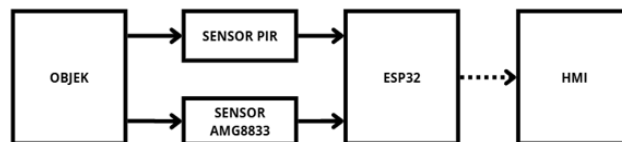
### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### A. Rancangan Sistem

Pada bagian ini menjelaskan tentang gambaran keseluruhan sistem, alur kerja sistem serta blok diagram secara keseluruhan pada penelitian ini.

- Gambar Keseluruhan Sistem

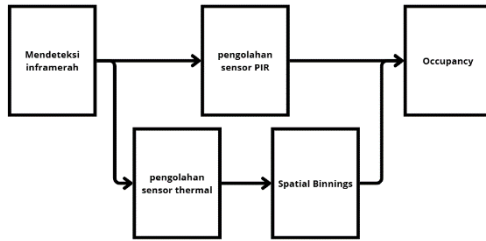
Bagian ini menjelaskan bagaimana gambaran sistem yang ada pada penelitian ini. Berikut ada gambaran keseluruhan sistem.



Gambar 7. Blok diagram keseluruhan sistem

Berdasarkan gambar 7 cara kerja sistem ini, ketika objek berjalan melewati sensor, data akan diolah oleh ESP32.

- Alur Kerja sistem



Gambar 8. Blok diagram alur kerja sistem

Gambar 8, tersebut menunjukkan sebuah diagram alur sistem deteksi hunian (occupancy detection) yang menggunakan kombinasi dua metode pengolahan data berbasis inframerah. Sistem ini bekerja secara paralel untuk meningkatkan akurasi deteksi keberadaan orang dalam suatu ruangan.

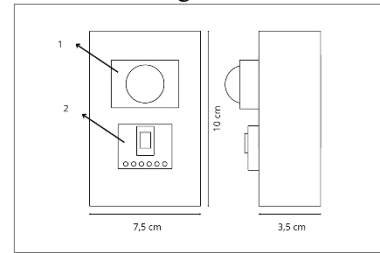
Berikut adalah penjelasan detail untuk setiap blok dalam diagram tersebut:

1. Mendeteksi Inframerah (Input Utama) Ini adalah tahap awal di mana sensor menangkap radiasi panas (inframerah) yang dipancarkan oleh objek di area cakupan. Radiasi ini kemudian diteruskan ke dua jalur pemrosesan yang berbeda.
2. Jalur Atas: Pengolahan Sensor PIR
  - Mekanisme: Menggunakan sensor Passive Infrared (PIR).
  - Fungsi: Sensor PIR sangat efektif untuk mendeteksi gerakan. Ia bekerja dengan cara mendeteksi perubahan mendadak dalam energi inframerah ketika ada objek panas (seperti manusia) yang bergerak melintasi bidang pandangnya.
  - Karakteristik: Cepat dalam mendeteksi orang yang masuk atau keluar, namun sering kali gagal mendeteksi orang yang diam (statis).
3. Jalur Bawah: Pengolahan Sensor Thermal & Spatial Binnings Jalur ini berfungsi untuk menutupi kelemahan sensor PIR:
  - Pengolahan Sensor Thermal: Menggunakan sensor Thermal Array yang mampu memetakan distribusi suhu di ruangan secara lebih rinci (seperti kamera panas beresolusi rendah).
  - Spatial Binnings: Data dari sensor thermal dibagi menjadi beberapa area atau "kotak" spasial tertentu (binning). Teknik ini digunakan untuk menganalisis posisi dan kepadatan panas di titik-titik spesifik. Ini memungkinkan sistem mendeteksi keberadaan orang meskipun mereka sedang diam atau tidak bergerak.
4. *Occupancy* (Output Akhir) Data dari kedua jalur tersebut digabungkan (fusi data) untuk menghasilkan kesimpulan akhir mengenai *Occupancy*:
  - Apakah ada orang di dalam ruangan tersebut?
  - Berapa jumlahnya atau di mana posisinya?

## B. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras mencakup gambaran perancangan perangkat keras dalam penelitian serta skematik rangkaian. Berikut adalah penjelasan lebih rinci mengenai setiap komponen dan skematik rangkaian yang digunakan.

- Gambaran Perancangan Alat Keras



Gambar 9. 2D

Gambar 9 berikut menunjukkan desain modul sensor berbasis multi-sensor yang terdiri dari dua komponen utama, yaitu sensor PIR (nomor 1) dan sensor kamera termal AMG8833 (nomor 2), yang ditempatkan di dalam sebuah housing berukuran  $10\text{ cm} \times 7,5\text{ cm} \times 3,5\text{ cm}$ . Sensor PIR yang berada pada posisi atas memiliki lensa kubah Fresnel dan berfungsi untuk mendeteksi keberadaan manusia berdasarkan perubahan radiasi inframerah akibat gerakan. Sementara itu, sensor kamera termal AMG8833 pada bagian bawah bekerja menangkap distribusi suhu tubuh manusia dalam bentuk matriks  $8 \times 8$  pixel, sehingga mampu mendeteksi keberadaan objek meskipun tidak bergerak. Susunan penempatan kedua sensor pada housing ini dirancang untuk memberikan area deteksi yang optimal, di mana PIR menangani deteksi gerakan cepat dan sensor termal memberikan verifikasi berdasarkan suhu tubuh untuk meningkatkan akurasi sistem.



Gambar 10. 3D

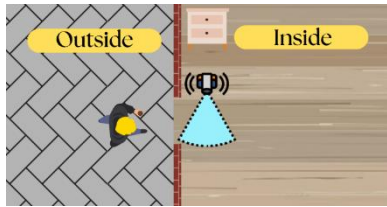
Pada gambar 10, sensor Thermal (AMG8833), sensor PIR dan ESP32 diletakkan pada BOX – 1 berukuran  $10\text{ cm} \times 7,5\text{ cm} \times 3,5\text{ cm}$ .



Gambar 11. Penempatan Alat



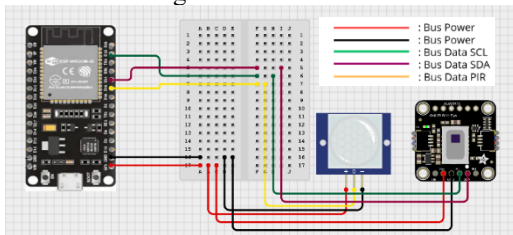
Pada gambar 11, kasus ini sensor-sensor di pasang di samping pintu dengan ketinggian 130 centi meter.



Gambar 12. Sistem Keseluruhan

Pada gambar 12 menunjukkan ilustrasi sistem deteksi okupansi berbasis multi-sensor yang dipasang di area pintu untuk memantau pergerakan manusia dari luar (*outside*) ke dalam ruangan (*inside*). Sensor PIR mendeteksi gerakan, sedangkan sensor termal AMG8833 membaca suhu tubuh manusia di bidang pandangnya. Kedua sensor terhubung ke mikrokontroler ESP32. Cara kerja dari multi-sensor ini dengan prinsip validasi ganda, di mana data dianggap valid jika keduanya mendeteksi secara bersamaan.

#### • Skematik Rangkaian



Gambar 13. Skematik Rangkaian

Berdasarkan gambar 13 berikut adalah penjelasan terkait dari skematik rangkaian:

#### 1. Adaptor Charger

Adaptor Charger digunakan untuk memberikan input tegangan ke ESP32

#### 2. Sensor PIR

Sensor PIR menggunakan tegangan input dari ESP32 yaitu 3.3V dengan konfigurasi sebagai berikut:

- VCC Sensor PIR dihubungkan ke pin 3.3V pada ESP32
- GND dari kedua sensor dihubungkan ke OUT (-) stepdown agar menjadi satu jalur ground.

#### 3. Sensor Thermal AMG8833

Sensor Thermal AMG8833 menggunakan tegangan input dari ESP32 yaitu 3.3V dengan konfigurasi sebagai berikut:

- VCC Sensor PIR dihubungkan ke pin 3.3V pada ESP32
- GND dari kedua sensor dihubungkan ke OUT (-) stepdown agar menjadi satu jalur ground.

#### 4. ESP32

ESP32 digunakan untuk mengontrol semua perangkat. Konfigurasi pin pada ESP32 adalah sebagai berikut:

- pin D19 : pin data sensor PIR
- pin D21 : pin data SCL AMG8833
- pin D22 : pin data SDA AMG8833

### C. Perancangan Perangkat Lunak

#### • Average

Rata-rata atau mean merupakan salah satu ukuran pemusatan data yang digunakan untuk mewakili nilai tengah dari sekumpulan data. Rata-rata banyak digunakan pada sistem sensor, analisis data lingkungan, statistik pengukuran, dan pengolahan sinyal untuk memperoleh nilai representatif dari sekumpulan pengamatan.

$$Average = \frac{\sum x}{n} \quad (3)$$

#### • Deviasi

Deviasi atau standard deviation adalah ukuran yang menunjukkan seberapa jauh data menyebar dari nilai rata-ratanya. Deviasi penting dalam sistem sensor karena dapat menunjukkan apakah pembacaan yang muncul konsisten (valid) atau terdapat anomali/noise.

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

#### • Spatial Binnings

Pada penelitian ini, mengikuti metode spatial binning yang diterapkan pada artikel sensor[10] dengan membagi frame thermal 8x8 piksel menjadi empat zona horizontal (bin) yang masing-masing terdiri dari 2x8 piksel. Pembagian ini bertujuan untuk mereduksi kompleksitas data dari 64 titik data menjadi 4 wilayah analisis yang lebih terstruktur.

Sistem mendeteksi arah pergerakan dengan menganalisis sequence aktivasi bins. Pola [1,2,3,4] mengindikasikan pergerakan dari kiri ke kanan (masuk), sedangkan pola [4,3,2,1] merepresentasikan pergerakan dari kanan ke kiri (keluar). Implementasi FIFO buffer memastikan proses analisis frame berjalan secara real-time.

Berikut adalah rangkuman lengkap alur kerja sistem deteksi pergerakan sensor 8x8, mulai dari penangkapan data mentah hingga pengambilan keputusan arah gerakan:

#### 1. Tahap Pra-pemrosesan: Normalisasi Citra

Langkah awal dalam algoritma ini adalah melakukan normalisasi terhadap frame mentah yang ditangkap oleh sensor. Setiap matriks berukuran 8x8 piksel pada waktu ke-t, yang dilambangkan sebagai  $F_t(x, y)$ , Akan dikonversi menjadi citra ekualisasi  $I_t(x, y)$

$$I_t(x, y) = \frac{F_t(x, y) - \min(F_t)}{\max(F_t) - \min(F_t)} \quad (5)$$

Proses ini bertujuan untuk menskalakan nilai intensitas piksel ke dalam rentang [0, 1], sehingga sistem memiliki ketahanan terhadap fluktuasi offset sensor dan perubahan kondisi lingkungan yang statis.

#### 2. Tahap Segmentasi: Pembagian Menjadi 4 Irisan

Setelah dilakukan normalisasi, citra  $I_t(x, y)$  dipartisi menjadi empat buah irisan vertikal (vertical slices) yang merepresentasikan zona pemantauan pada pintu. Berdasarkan Persamaan (2), setiap irisan  $i$  mencakup dua kolom sensor secara berurutan:

$$I_{t,i} = I_t(x,y) \text{ untuk } (i-1) \cdot 2 + 1 \leq x \leq (i-1) \cdot 2 + 2, 1 \leq y \leq 8, i \in [1,4] \quad (6)$$

Pembagian ini memungkinkan algoritma untuk melacak posisi subjek secara lateral (menyamping) dari kolom 1 hingga kolom 8.

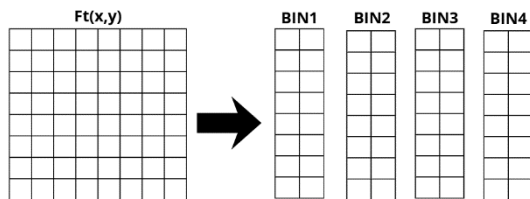
### 3. Tahap Ekstraksi Fitur: Penghitungan Daya (Power)

Sistem menghitung kepadatan energi atau "daya" (P) dari setiap irisan. Mengkuadratkan nilai piksel membantu memperjelas perbedaan antara tubuh manusia dan gangguan kecil (noise).

$$P_{t,i} = \frac{\sum I_{t,i}^2}{16} \quad (7)$$

Penggunaan nilai kuadrat berfungsi untuk memberikan bobot yang lebih signifikan terhadap objek dengan intensitas tinggi (subjek manusia) dibandingkan dengan gangguan noise skala kecil.

### 4. Tahap Pengambilan Keputusan: Ambang Batas Dinamis



Gambar 14. Pembagian frame menjadi beberapa bagian

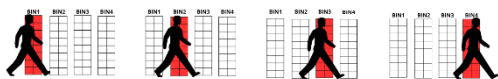
Gambar 14, Agar Guna membedakan antara pergerakan subjek nyata dengan fluktuasi latar belakang, diterapkan sebuah ambang batas dinamis  $T_t$ . Ambang batas ini dihitung dengan mempertimbangkan akumulasi daya dari seluruh irisan dalam rentang jendela waktu lima frame terakhir ( $t-4$  hingga  $t$ )

$$T_t = k \sum_{i=1}^4 \sum_{t'=t-4}^t P_{t',i} \quad (8)$$

Di mana  $k$  merupakan konstanta sensitivitas yang ditentukan untuk mengoptimalkan presisi deteksi  $i$ .

### 5. Tahap Inferensi Tindakan dan Logika FIFO

Sebagai tahap akhir dari algoritma ini adalah penarikan kesimpulan (inference) mengenai tindakan yang dilakukan subjek berdasarkan data yang telah diproses dalam buffer FIFO. Gambar 5 di atas mengilustrasikan urutan aktivasi irisan (bin activation sequence) yang merepresentasikan gerakan dari kiri ke kanan.



Gambar 15. Contoh deret waktu bin ketika suatu subjek bergerak dari kiri ke kanan

Gambar 15, Analisis dari tahapan inferensi ini adalah sebagai berikut:

#### 1) Generasi Deret Waktu Aktivasi (Event Detection)

Secara kronologis (baca dari kiri ke kanan diagram), algoritma mendeteksi lonjakan daya ( $P_{t,i}$ ) yang melewati ambang batas ( $T_t$ ) pada setiap bin secara bergantian:

- Langkah A (Deteksi Awal): Subjek masuk ke area sensor, memicu deteksi pada BIN 1. (Deret: [1])
- Langkah B (Transisi Teks): Pergerakan berlanjut, memicu deteksi pada BIN 2, sementara daya pada BIN 1 mulai menurun. (Deret: [1, 2])
- Langkah C (Transisi Teks): Subjek berada di zona tengah, memicu deteksi pada BIN 3. (Deret: [1, 2, 3])
- Langkah D (Deteksi Akhir): Pergerakan berakhir di area sensor kanan, memicu deteksi pada BIN 4 sebelum subjek keluar dari jangkauan sensor sepenuhnya. (Deret Lengkap: [1, 2, 3, 4])

#### 2) Pencocokan Pola Tindakan (Pattern Matching)

Deret waktu aktivasi yang dihasilkan secara utuh dari Gambar 5 adalah [1, 2, 3, 4]. Berdasarkan mekanisme referensi (Tabel 3), pola deret waktu yang menunjukkan aktivasi menaik (ascending order) ini secara otomatis diklasifikasikan sebagai Peristiwa Keluar (Output Event).

#### D. Flowchart Keseluruhan Sistem

- Flowchart Sistem



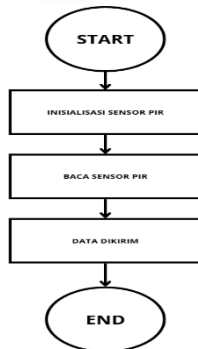
Gambar 16. Flowchart Sistem

Berdasarkan gambar 16, berikut adalah penjelasan flowchart:

Alur sistem deteksi okupansi dimulai dengan pembacaan data secara simultan dari sensor PIR dan AMG8833. Tahap awal melibatkan verifikasi gerakan melalui sensor PIR; jika gerakan terdeteksi, sistem akan mengevaluasi data suhu dari AMG8833 untuk mengonfirmasi keberadaan manusia. Selanjutnya, dilakukan analisis spatial binning dengan membagi area pengukuran guna menentukan arah pergerakan objek. Setelah arah pergerakan teridentifikasi, data okupansi

dikirimkan ke HMI sebagai output akhir sebelum sistem mengakhiri siklus dan kembali ke tahap awal.

- Flowchart Sensor PIR

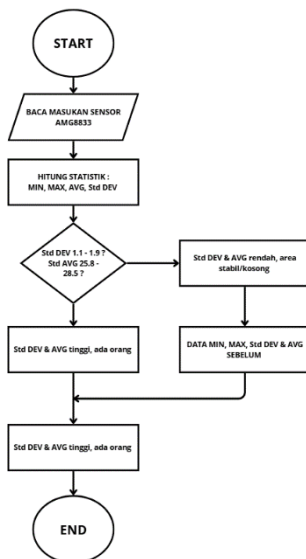


Gambar 17. Flowchart Sensor PIR

Berdasarkan gambar 17, berikut adalah penjelasan flowchart:

Flowchart sensor PIR menunjukkan tahapan pembacaan dan validasi data dari sensor PIR. Setelah inisialisasi, sistem membaca nilai keluaran sensor lalu mengirim data ke HMI.

- Flowchart Sensor AMG8833



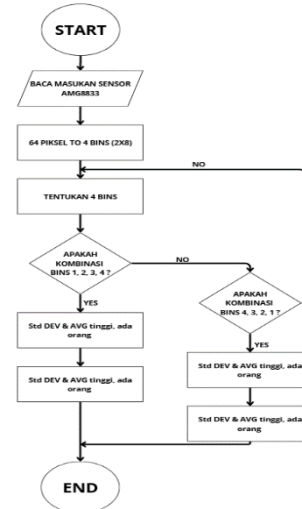
Gambar 18. Flowchart Sensor AMG8833

Berdasarkan gambar 18, berikut adalah penjelasan flowchart:

Alur kerja sensor AMG8833 berfokus pada pengolahan 64 piksel suhu termal guna menentukan keberadaan manusia melalui parameter statistik. Setelah pembacaan data piksel, sistem menghitung nilai minimum, maksimum, rata-rata (average), serta standar deviasi untuk dianalisis berdasarkan ambang batas (*threshold*) tertentu. Keberadaan manusia diidentifikasi apabila distribusi panas menunjukkan ketidakstabilan, ditandai dengan nilai standar deviasi pada rentang 1,1–1,97 dan suhu rata-rata antara 25,8–28,5°C. Sebaliknya, nilai statistik yang rendah mengindikasikan bahwa

area dalam keadaan stabil atau kosong. Seluruh hasil pengolahan data statistik tersebut kemudian dikirimkan ke HMI sebagai informasi status okupansi secara real-time.

- Flowchart Spatial Binnings



Gambar 19. Flowchart Spatial Binnings

Berdasarkan gambar 19, berikut adalah penjelasan flowchart:

Alur spatial binning dirancang untuk menentukan arah pergerakan manusia dengan memanfaatkan distribusi data suhu dari sensor AMG8833. Proses ini dimulai dengan pembacaan 64 piksel termal yang kemudian dikelompokkan menjadi empat bagian (bin), masing-masing berukuran 2×8 piksel. Sistem mengidentifikasi arah pergerakan dengan menganalisis urutan aktivasi bin yang memiliki suhu lebih tinggi; pergerakan masuk terdeteksi jika aktivasi terjadi secara berurutan dari bin 1 menuju bin 4, sedangkan pergerakan keluar terdeteksi jika urutan aktivasi terjadi sebaliknya, dari bin 4 menuju bin 1. Hasil identifikasi dari urutan aktivasi tersebut kemudian ditetapkan sebagai output akhir untuk menentukan status pergerakan objek dalam sistem.

## IV. SIMULASI DAN ANALISA

### 1. Implementasi Perancangan Alat Keras

Implementasi sistem ini melibatkan integrasi berbagai komponen perangkat keras utama yang telah dikonfigurasi secara fungsional. Adapun arsitektur fisik serta keterkaitan antar-komponen dalam sistem tersebut ditunjukkan pada Gambar 20 berikut:





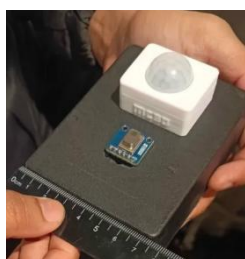
Gambar 20. Perancangan Perangkat Keras

Berdasarkan gambar 20 berikut adalah implementasi perancangan perangkat keras:

Ukuran box



Gambar 21. Panjang Box



Gambar 22. Lebar Box



Gambar 23. Tinggi Box

Berdasarkan gambar 20, 21, 22, dan 2.3 berikut tabel spesifikasi box yang diatas :

Tabel 2. Spesifikasi Implementasi Alat

| Bagian Box        | Ukuran Box (cm) |
|-------------------|-----------------|
| Panjang Box       | 10 cm           |
| Lebar Box         | 7,5 cm          |
| Tinggi Box        | 3,5 cm          |
| Ketinggian Tempat | 130 cm          |

## 2. Pengujian Slat Spatial Binnings Masuk

### A. Pengujian Alat

Pada pengujian kali ini di dapatkan hasil rata rata dari data average dan standar deviasi pada saat tidak ada objek dan saat ada objek.

Tabel 3. Pengujian Alat(Masuk)

| Kondisi real    | AMG8833 |     | PIR | O <sub>2</sub> | Gambar & Pixel | Spatial Binning (In/Out) | Keberhasilan (✓/ ✗) |
|-----------------|---------|-----|-----|----------------|----------------|--------------------------|---------------------|
|                 | Avg     | Dev |     |                |                |                          |                     |
| Tidak ada objek | 23,6    | 0,4 | 0   | 0              |                | -                        | -                   |
| Ada objek       | 26,2    | 1,5 | 1   | 1              |                | In                       | ✓                   |

Pada Tabel 3 ditampilkan perbandingan kondisi ruangan antara tidak ada objek dan ada objek. Pada kondisi tidak ada objek, nilai AVG sebesar 23,6°C dengan DEV 0,4 dan PIR bernilai 0, serta visualisasi pixel menampilkan warna biru solid yang mencerminkan distribusi suhu merata. Sedangkan pada kondisi ada objek, nilai AVG meningkat menjadi 26,2°C dan DEV naik menjadi 1,5, yang mengindikasikan adanya radiasi panas tubuh manusia. Hal ini juga terlihat pada visualisasi pixel yang menampilkan perpaduan warna biru dan hijau sebagai tanda adanya hotspot panas. Sensor PIR berhasil mendeteksi gerakan dengan nilai 1 dan sistem Spatial Binnings berhasil mengklasifikasikan pergerakan sebagai "Masuk" dengan hasil keberhasilan.

### B. Pengujian Alat Berdasarkan waktu(Pagi,Siang,Sore)

Pada pengujian alat kali ini di dapatkan hasil rata-rata dari data Average dan Standar Deviasi pada waktu pagi, siang, dan sore:

Tabel 4. Pengujian Alat Berdasarkan Waktu Pagi, Siang, Sore(Masuk)

| waktu pagi<br>08.00 - 10.00 |     | waktu siang<br>.00 - 14.00 |     | waktu sore<br>16.00 - 18.00 |     |
|-----------------------------|-----|----------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| AVG                         | DEV | AVG                        | DEV | AVG                         | DEV |
| 23,76                       | 0,3 | 24,80                      | 0,4 | 25,11                       | 0,4 |

Pada tabel 4, nilai rata-rata (AVG) mengalami kenaikan bertahap dari pagi (23,76), siang (24,80), hingga sore hari (25,11). Meskipun terdapat kenaikan nilai dasar (baseline) seiring perubahan waktu, tingkat presisi data tergolong sangat stabil dengan nilai deviasi (DEV) yang konsisten di angka 0,4°C. Hal ini menunjukkan bahwa instrumen memiliki tingkat keterulangan (repeatability) yang baik, sehingga data ini valid digunakan sebagai parameter acuan dalam pengujian selanjutnya.

### 1. Waktu Pagi

Tabel 5. Perbandingan Kondisi Pada Waktu Pagi(Masuk)

| Kondisi         | AMG8833 |     | PIR | Occ | Spatial Binnings (In/Out) | Keberhasilan (✓/✗) |
|-----------------|---------|-----|-----|-----|---------------------------|--------------------|
|                 | Avg     | Dev |     |     |                           |                    |
| Tidak ada objek | 23,7    | 0,3 | 0   | 0   | -                         | -                  |
| Ada objek       | 25,7    | 1,9 | 1   | 1   | In                        | ✓                  |

Pada Tabel 5 ditampilkan perbandingan antara kondisi tidak ada objek dan ada objek pada waktu pagi. Kondisi tidak ada objek menunjukkan nilai AVG sebesar 23,7°C dengan DEV 0,3°C dan PIR bernilai 0, yang mengindikasikan suhu ruangan stabil dan homogen. Sedangkan pada kondisi ada objek, nilai AVG meningkat menjadi 25,7°C dan DEV naik signifikan menjadi 1,9°C, yang menunjukkan adanya pengaruh radiasi panas tubuh manusia terhadap sensor. Sensor PIR juga berhasil mendeteksi gerakan dengan nilai 1 dan sistem Spatial Binnings berhasil mengklasifikasikan pergerakan sebagai "Masuk" dengan hasil keberhasilan.

### 2. Waktu Siang

Tabel 6. Perbandingan Kondisi Pada Waktu Siang(Masuk)

| Kondisi         | AMG8833 |     | PIR | Occ | Spatial Binnings (In/Out) | Keberhasilan (✓/✗) |
|-----------------|---------|-----|-----|-----|---------------------------|--------------------|
|                 | Avg     | Dev |     |     |                           |                    |
| Tidak ada objek | 24,8    | 0,4 | 0   | 0   | -                         | -                  |
| Ada objek       | 25,8    | 1,6 | 1   | 1   | In                        | ✓                  |

Pada Tabel 6 ditampilkan perbandingan antara kondisi tidak ada objek dan ada objek pada waktu siang. Kondisi tidak ada objek menunjukkan nilai AVG sebesar 24,8°C dengan DEV 0,4°C dan PIR bernilai 0, yang mengindikasikan suhu ruangan dalam keadaan stabil. Sedangkan pada kondisi ada objek, nilai AVG meningkat menjadi 25,8°C dan DEV naik menjadi 1,6°C, yang menunjukkan adanya pengaruh radiasi panas tubuh manusia terhadap sensor. Sensor PIR berhasil mendeteksi gerakan dengan nilai 1 dan sistem Spatial Binnings berhasil mengklasifikasikan pergerakan sebagai "Masuk" dengan hasil keberhasilan.

### 3. Waktu Sore

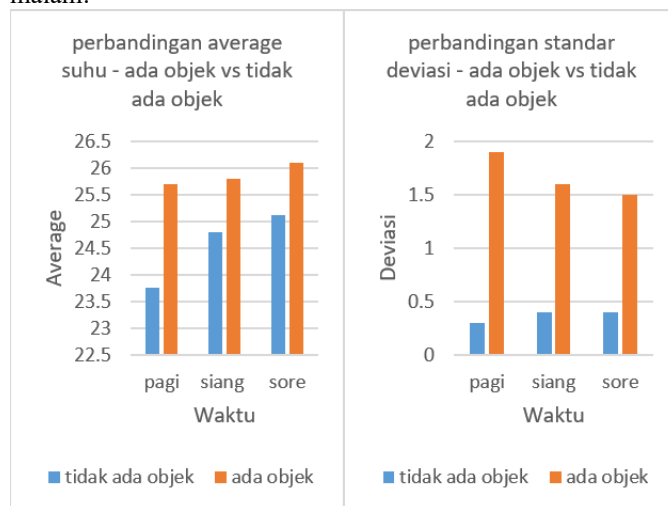
Tabel 7. Perbandingan Kondisi Pada Waktu Sore(Masuk)

| Kondisi         | AMG8833 |     | PIR | Occ | Spatial Binnings (In/Out) | Keberhasilan (✓/✗) |
|-----------------|---------|-----|-----|-----|---------------------------|--------------------|
|                 | Avg     | Dev |     |     |                           |                    |
| Tidak ada objek | 25,1    | 0,4 | 0   | 0   | -                         | -                  |
| Ada objek       | 26,1    | 1,5 | 1   | 1   | In                        | ✓                  |

Pada Tabel 7 ditampilkan perbandingan antara kondisi tidak ada objek dan ada objek pada waktu sore. Kondisi tidak ada objek menunjukkan nilai AVG sebesar 25,1°C dengan DEV 0,4 dan PIR bernilai 0, yang mengindikasikan suhu ruangan dalam keadaan stabil. Sedangkan pada kondisi ada objek, nilai AVG meningkat menjadi 26,1°C dan DEV naik menjadi 1,5, yang menunjukkan adanya pengaruh radiasi panas tubuh manusia terhadap sensor. Sensor PIR berhasil mendeteksi gerakan dengan nilai 1 dan sistem Spatial Binnings

berhasil mengklasifikasikan pergerakan sebagai "Masuk" dengan hasil keberhasilan.

Analisa AMG8833 (Average & Deviasi) pagi, siang, malam:



Gambar. 24 Grafik Perbandingan AVG & DEV

Berdasarkan gambar 24 grafik diatas, perbandingan hasil pengujian, sistem menunjukkan performa deteksi yang valid melalui dua parameter utama. Pertama, pada grafik rata-rata suhu, terjadi peningkatan nilai yang konsisten setiap kali objek hadir dalam jangkauan sensor, dengan diferensiasi paling kontras terlihat pada waktu pagi hari. Kedua, grafik standar deviasi menunjukkan perbedaan karakteristik data yang signifikan; kondisi tanpa objek ditandai dengan deviasi rendah (<0,5°C) yang menunjukkan stabilitas tinggi, sementara kondisi dengan objek ditandai dengan lonjakan deviasi (1,5°C –1,9°C). Tingginya nilai deviasi pada saat ada objek mengonfirmasi adanya perubahan distribusi panas yang dinamis pada matriks sensor AMG8833. Secara keseluruhan, korelasi antara peningkatan nilai rata-rata dan lonjakan deviasi ini membuktikan bahwa sistem secara efektif mampu membedakan keberadaan objek dari suhu lingkungan sekitar.

### C. Pengujian Alat Berdasarkan Pakaian

Tabel 8. Kondisi Terhadap Pakaian(Masuk)

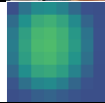
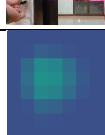
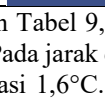
| Kondisi                                                                              |     |     |                                                                                       |     |     | Occ | Spatial Binnings (In/Out) | Keberhasilan (✓/✗) |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|---------------------------|--------------------|
| Objek Menggunakan Pakaian Tebal                                                      |     |     | Objek Menggunakan Pakaian Tipis                                                       |     |     |     |                           |                    |
| Avg                                                                                  | Dev | PIR | Avg                                                                                   | Dev | PIR |     |                           |                    |
| 25,5                                                                                 | 1,1 | 1   | 26,4                                                                                  | 1,7 | 1   | 1   | In                        | ✓                  |
|  |     |     |  |     |     | -   | -                         | -                  |
|   |     |     |  |     |     | -   | -                         | -                  |

Pada table table 8 kondisi masuk menunjukkan bahwa objek dengan pakaian tipis menghasilkan nilai average suhu lebih tinggi (26,4°C) dibandingkan pakaian tebal (25,5°C).

Perbedaan ini terjadi karena pakaian tipis memiliki insulasi termal yang lebih rendah sehingga panas tubuh lebih banyak terpancar ke sensor AMG8833. Standar deviasi pakaian tipis ( $1,7^{\circ}\text{C}$ ) juga lebih besar dari pakaian tebal ( $1,1^{\circ}\text{C}$ ), yang mengindikasikan distribusi suhu pada pakaian tipis lebih bervariasi dengan kontras hotspot yang lebih tajam. Meskipun terdapat perbedaan karakteristik thermal, kedua kondisi menghasilkan nilai  $\text{PIR} = 1$ , yang berarti sistem berhasil mendeteksi objek masuk tanpa dipengaruhi oleh jenis pakaian yang digunakan.

#### D. Pengujian Alat Berdasarkan Jarak

Tabel 9. Kondisi Setiap Jarak(Masuk)

| Kondisi Jarak | Avg  | Dev | PIR | Osc | Gambar & pixel                                                                                                                                                             | Spatial Binnings (In/Out) | Keberhasilan (✓/✗) |
|---------------|------|-----|-----|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Dekat 10cm    | 26,8 | 1.6 | 1   | 1   | <br>     | In                        | ✗                  |
| Sedang 15cm   | 27,3 | 1.3 | 1   | 1   | <br>  | In                        | ✓                  |
| Jauh 33cm     | 26,3 | 1.3 | 1   | 1   | <br> | In                        | ✓                  |

Berdasarkan Berdasarkan Tabel 9, diperoleh hasil kondisi setiap jarak sebagai berikut. Pada jarak dekat (10 cm) diperoleh average  $26,8^{\circ}\text{C}$  dengan deviasi  $1,6^{\circ}\text{C}$ . Pada jarak sedang (15 cm) diperoleh average tertinggi, yaitu  $27,3^{\circ}\text{C}$  dengan deviasi  $1,3^{\circ}\text{C}$ , menunjukkan cakupan bidang pandang sensor terhadap tubuh objek paling optimal pada jarak ini. Sedangkan pada jarak jauh (33 cm), average kembali menurun menjadi  $26,3^{\circ}\text{C}$  dengan deviasi  $1,3^{\circ}\text{C}$  sesuai prinsip atenuasi radiasi terhadap jarak. Pada ketiga kondisi jarak tersebut, sensor PIR konsisten mendeteksi gerakan dengan nilai 1, menunjukkan bahwa keterbatasan pada jarak dekat murni terjadi pada tahap analisis distribusi suhu dan spatial binning, bukan pada tahap deteksi gerakan awal oleh PIR.

Pada jarak dekat, sistem menunjukkan keterbatasan dalam menentukan arah pergerakan secara konsisten, di mana distribusi panas yang tidak merata pada matriks piksel AMG8833 menyebabkan pola aktivasi bin tidak terbentuk lengkap, sehingga status arah pergerakan tidak dapat ditentukan secara andal meskipun PIR telah mendeteksi adanya gerakan.

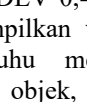
Pada jarak sedang dan jauh, distribusi panas lebih merata sehingga seluruh bin teraktivasi berurutan dan sistem berhasil mengklasifikasikan pergerakan sebagai "Masuk" dengan baik.

### 3. Pengujian Spatial Binnings Keluar

#### A. Pengujian Alat

Pada pengujian kali ini di dapatkan hasil rata rata dari data average dan standar deviasi pada saat tidak ada objek dan saat objek berada di depan alat:

Tabel 10. Pengujian Alat(keluar)

| Kondisi real    | AMG8833 |     | PIR | Osc | Gambar                                                                                                                                                                      | Spatial Binning (In/Out) | Keberhasilan (✓/✗) |
|-----------------|---------|-----|-----|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------|
|                 | Avg     | Dev |     |     |                                                                                                                                                                             |                          |                    |
| Tidak ada objek | 23.6    | 0.4 | 0   | 0   | <br>  | -                        | -                  |
| Ada objek       | 26.2    | 1.5 | 1   | 1   | <br> | Out                      | ✓                  |

Pada Tabel 10 ditampilkan hasil pengujian alat pada kondisi keluar. Kondisi tidak ada objek menunjukkan nilai AVG sebesar  $23,6^{\circ}\text{C}$  dengan DEV  $0,4^{\circ}\text{C}$  dan PIR bernilai 0, serta visualisasi pixel menampilkan warna biru solid yang mencerminkan distribusi suhu merata dan homogen. Sedangkan pada kondisi ada objek, nilai AVG meningkat menjadi  $26,2^{\circ}\text{C}$  dan DEV naik menjadi  $1,5^{\circ}\text{C}$ , yang mengindikasikan adanya radiasi panas tubuh manusia yang tertangkap oleh sensor. Hal ini juga terlihat pada visualisasi pixel yang menampilkan perpaduan warna biru dan hijau sebagai tanda adanya hotspot panas di area tengah frame. Sensor PIR berhasil mendeteksi gerakan dengan nilai 1 dan sistem Spatial Binnings berhasil mengklasifikasikan pergerakan sebagai "Keluar" dengan hasil keberhasilan.

#### B. Pengujian Alat Berdasarkan Waktu(Pagi, Siang, Sore)

Pada pengujian alat kali ini di dapatkan hasil rata-rata dari data Average dan Standar Deviasi pada waktu pagi, siang, dan sore:

Tabel 11. Pengujian Alat berdasarkan Waktu Pagi, Siang, Sore(Keluar)

| waktu pagi<br>08.00 - 10.00 |     | waktu siang<br>12.00 - 14.00 |     | waktu sore<br>20.00 - 22.00 |     |
|-----------------------------|-----|------------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| AVG                         | DEV | AVG                          | DEV | AVG                         | DEV |
| 23,76                       | 0,3 | 24,80                        | 0,4 | 25,11                       | 0,4 |

Pada tabel 11 , nilai rata-rata (AVG) mengalami kenaikan bertahap dari pagi ( $23,76^{\circ}\text{C}$ ), siang ( $24,80^{\circ}\text{C}$ ), hingga sore hari ( $25,11^{\circ}\text{C}$ ). Meskipun terdapat kenaikan nilai dasar (baseline) seiring perubahan waktu, tingkat presisi data tergolong sangat stabil dengan nilai deviasi (DEV) yang konsisten di angka  $0,4^{\circ}\text{C}$ . Hal ini menunjukkan bahwa instrumen memiliki tingkat keterulangan (repeatability) yang baik, sehingga data ini valid

digunakan sebagai parameter acuan dalam pengujian selanjutnya.

### 1. Waktu Pagi

Tabel 12. Perbandingan Kondisi pada Waktu Pagi(Keluar)

| Kondisi         | AMG8833 |     | PIR | Occ | Spatial Binnings (In/Out) | Keberhasilan (✓/✗) |
|-----------------|---------|-----|-----|-----|---------------------------|--------------------|
|                 | Avg     | Dev |     |     |                           |                    |
| Tidak ada objek | 23,7    | 0,3 | 0   | 0   | -                         | -                  |
| Ada objek       | 26,2    | 2,1 | 1   | 1   | Out                       | ✓                  |

Pada Tabel 12 ditampilkan perbandingan kondisi tidak ada objek dan ada objek pada waktu pagi. Kondisi tidak ada objek menunjukkan nilai AVG sebesar 23,7°C dengan DEV 0,4°C dan PIR bernilai 0, yang mengindikasikan suhu ruangan dalam keadaan stabil dan homogen. Sedangkan pada kondisi ada objek, nilai AVG meningkat menjadi 26,2°C dan DEV naik signifikan menjadi 2,1°C, yang menunjukkan adanya distribusi panas dari tubuh manusia yang terdeteksi oleh sensor termal. Selain itu, sensor PIR berubah dari nilai 0 menjadi 1 yang menandakan adanya pergerakan objek. Sistem Spatial Binnings berhasil mengklasifikasikan pergerakan sebagai "Keluar" dengan hasil keberhasilan ✓.

### 2. Waktu Siang

Tabel 13. Perbandingan Kondisi pada Waktu Siang(Keluar)

| Kondisi         | AMG8833 |     | PIR | Occ | Spatial Binnings (In/Out) | Keberhasilan (✓/✗) |
|-----------------|---------|-----|-----|-----|---------------------------|--------------------|
|                 | Avg     | Dev |     |     |                           |                    |
| Tidak ada objek | 24,8    | 0,4 | 0   | 0   | -                         | -                  |
| Ada objek       | 25,9    | 1,7 | 1   | 1   | Out                       | ✓                  |

Pada Tabel 13 menunjukkan adanya perbedaan nilai antara kondisi tidak ada objek dan ada objek. Pada kondisi terdapat objek, sensor AMG8833 mengalami peningkatan nilai average suhu dari 24,8°C menjadi 25,94°C, sedangkan nilai deviasi meningkat dari 0,4°C menjadi 1,7°C. Peningkatan tersebut menunjukkan adanya perubahan distribusi suhu akibat keberadaan objek di depan sensor. Selain itu, nilai sensor PIR berubah dari 0 menjadi 1 yang menandakan adanya gerakan yang berhasil terdeteksi. Berdasarkan hasil tersebut, sistem mampu membedakan kondisi ada objek dan tidak ada objek melalui parameter suhu dan deteksi gerakan.

### 3. Waktu Sore

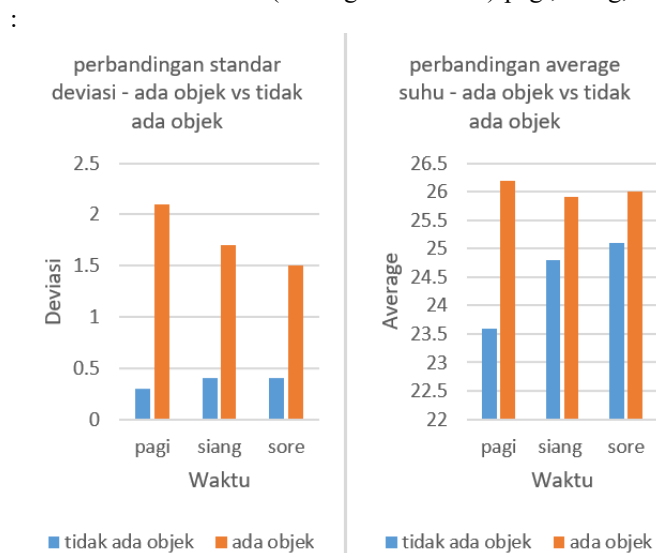
Tabel 14. Perbandingan Kondisi pada Waktu Sore(Keluar)

| Kondisi         | AMG8833 |     | PIR | Occ | Spatial Binnings (In/Out) | Keberhasilan (✓/✗) |
|-----------------|---------|-----|-----|-----|---------------------------|--------------------|
|                 | Avg     | Dev |     |     |                           |                    |
| Tidak ada objek | 25,1    | 0,4 | 0   | 0   | -                         | -                  |
| Ada objek       | 26      | 1,5 | 1   | 1   | Out                       | ✓                  |

Pada Tabel 14 ditampilkan perbandingan kondisi tidak ada objek dan ada objek pada waktu sore. Kondisi tidak ada objek menunjukkan nilai AVG sebesar 25,1°C dengan DEV 0,4°C dan PIR bernilai 0, yang mengindikasikan suhu ruangan dalam keadaan stabil. Sedangkan pada kondisi ada objek, nilai AVG meningkat menjadi 26°C dan DEV naik menjadi 1,5°C, yang menunjukkan adanya pengaruh radiasi panas tubuh manusia

terhadap sensor. Selain itu, sensor PIR berubah dari nilai 0 menjadi 1 yang menandakan adanya pergerakan objek. Sistem Spatial Binnings berhasil mengklasifikasikan pergerakan sebagai "Keluar" dengan hasil keberhasilan ✓.

Analisa AMG8833 (Average & Deviasi) pagi, siang, sore

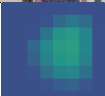


Gambar. 25 Grafik Perbandingan AVG & DEV

Berdasarkan gambar 25 grafik analisa sensor AMG8833 pada pagi, siang, dan malam, terlihat perbedaan nilai average suhu dan standar deviasi antara kondisi ada objek dan tidak ada objek. Pada kondisi tanpa objek, nilai average berada pada rentang 23,6°C–25,1°C dengan standar deviasi sekitar 0,3–0,4, yang menunjukkan suhu ruangan relatif stabil dan homogen. Sedangkan pada kondisi terdapat objek, nilai average meningkat hingga sekitar 26°C dan standar deviasi naik menjadi 1,5–2,1°C akibat adanya distribusi panas dari tubuh manusia pada beberapa piksel sensor. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keberadaan objek dapat dideteksi melalui peningkatan nilai average dan standar deviasi.

### C. Pengujian Alat Berdasarkan Pakaian

Tabel 15. Kondisi Terhadap Pakaian(Keluar)

| Kondisi                                                                              |     |     |                                                                                       |     |     | Occ | Spatial Binnings (In/Out) | Keberhasilan (✓ / ✕) |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|---------------------------|----------------------|
| Objek Menggunakan Pakaian Tebal                                                      |     |     | Objek Menggunakan Pakaian Tipis                                                       |     |     |     |                           |                      |
| Avg                                                                                  | Dev | PIR | Avg                                                                                   | Dev | PIR |     |                           |                      |
| 25,7                                                                                 | 1,2 | 1   | 26,5                                                                                  | 1,8 | 1   | 1   | Out                       | ✓                    |
|  |     |     |  |     |     | -   | -                         | -                    |
|  |     |     |  |     |     | -   | -                         | -                    |

Pada Tabel 15 menunjukkan bahwa objek dengan pakaian tipis memiliki nilai average suhu lebih tinggi yaitu 26,5°C



dibandingkan pakaian tebal sebesar 25,7°C. Selain itu, nilai standar deviasi pakaian tipis sebesar 1,8°C lebih besar dibandingkan pakaian tebal sebesar 1,2°C, yang menunjukkan distribusi suhu lebih bervariasi. Meskipun terdapat perbedaan nilai thermal, kedua kondisi menghasilkan nilai PIR = 1 sehingga sistem tetap mampu mendeteksi objek keluar dengan baik menggunakan sensor AMG8833.

#### D. Pengujian Alat Berdasarkan Jarak

Tabel 16. Kondisi Setiap Jarak(Keluar)

| Kondisi Jarak | Avg  | Dev | PIR | Occ | Gambar & pixel                                                                      | Spatial Binnings (In/Out) | Keberhasilan (✓/✗) |
|---------------|------|-----|-----|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Dekat 10cm    | 26,8 | 1,6 | 1   | 1   |    | Out                       | ✗                  |
| Sedang 15cm   | 27,6 | 1,6 | 1   | 1   |    | Out                       | ✓                  |
| Jauh 33cm     | 26,6 | 1,4 | 1   | 1   |  | Out                       | ✓                  |

Pada Tabel 16, diperoleh hasil kondisi setiap jarak dengan pola yang serupa dengan kondisi masuk. Pada jarak dekat (10 cm) diperoleh average 26,8°C dengan deviasi 1,6°C. Pada jarak sedang (15 cm) diperoleh average tertinggi, yaitu 27,6°C dengan deviasi 1,6°C, menunjukkan cakupan bidang pandang sensor terhadap tubuh objek paling optimal pada jarak ini. Sedangkan pada jarak jauh (33 cm), average kembali menurun menjadi 26,6°C dengan deviasi 1,4°C sesuai prinsip atenuasi radiasi terhadap jarak. Sama seperti kondisi masuk, sensor PIR konsisten mendeteksi gerakan dengan nilai 1 pada ketiga jarak tersebut, sehingga kegagalan pada jarak dekat murni disebabkan oleh keterbatasan analisis distribusi suhu pada spatial binning, bukan oleh kegagalan sensor PIR dalam mendeteksi gerakan.

Pada jarak dekat, sistem menunjukkan keterbatasan dalam menentukan arah pergerakan secara konsisten, di mana distribusi panas yang tidak merata pada matriks piksel AMG8833 menyebabkan pola aktivasi bin tidak terbentuk lengkap, sehingga status arah pergerakan tidak dapat ditentukan secara andal meskipun PIR telah mendeteksi adanya gerakan. Pada jarak sedang dan jauh, distribusi panas lebih merata

sehingga seluruh bin teraktivasi berurutan dan sistem berhasil mengklasifikasikan pergerakan sebagai "Keluar" dengan baik.

## V. KESIMPULAN

Sistem deteksi okupansi yang dirancang berhasil menjaga privasi pengguna karena tidak menggunakan kamera visual (CCTV), melainkan sensor PIR dan kamera thermal beresolusi rendah 8×8 piksel (AMG8833) yang hanya menangkap distribusi suhu tubuh tanpa merekam identitas visual penghuni.

Sistem multi-sensor (PIR + AMG8833) berbasis ESP32 dengan metode spatial binning (4 bin) berhasil dirancang dan diimplementasikan untuk menentukan arah pergerakan. Pengujian menunjukkan pola nilai yang konsisten: average tanpa objek naik dari 23,76°C (pagi) hingga 25,1°C (sore), sedangkan dengan objek berkisar 25,76–26,25°C; pakaian tipis menghasilkan average dan deviasi lebih tinggi (26,4–26,5°C; 1,7–1,8°C) dibanding pakaian tebal (25,5–25,7°C; 1,1–1,2°C); dan average tertinggi terjadi pada jarak sedang 15 cm (27,3–27,69°C). Standar deviasi terbukti menjadi indikator keberadaan objek yang lebih konsisten dibanding average, dengan kondisi kosong stabil di bawah 0,5 dan kondisi ada objek melonjak ke 1,1–2,1. Sistem konsisten berhasil mengklasifikasikan arah "Masuk" maupun "Keluar" pada seluruh kondisi waktu dan pakaian, serta pada jarak sedang dan jauh.

Sistem masih memiliki keterbatasan dalam menentukan arah pergerakan secara konsisten pada jarak sangat dekat (10 cm) dan objek berdempetan, akibat distribusi panas yang tidak merata atau tumpang tindih pada matriks piksel AMG8833, serta kesalahan arah yang bersifat acak. Hal ini menunjukkan algoritma spatial binning masih perlu disempurnakan untuk kondisi jarak ekstrem dan objek jamak. Secara keseluruhan, sistem multi-sensor ini telah memenuhi tujuan penelitian sebagai sistem deteksi okupansi yang menjaga privasi dengan tingkat keberhasilan tinggi, meskipun masih memerlukan penyempurnaan untuk beberapa kondisi objek.

#### Saran

Untuk pengembangan sistem ke depannya, disarankan agar pengujian diperluas dengan menambahkan variabel kecepatan pergerakan dan sudut masuk objek guna mendapatkan data yang lebih komprehensif. Penggunaan sensor thermal beresolusi lebih tinggi seperti MLX90640 (32×24 piksel) juga direkomendasikan untuk meningkatkan akurasi deteksi terutama pada kondisi beberapa orang berjalan berdempetan. Selain itu, sistem perlu diuji pada kondisi suhu lingkungan ekstrem dan dikembangkan lebih lanjut dengan mengintegrasikan output okupansi ke sistem kontrol pencahayaan dan pendingin ruangan secara otomatis guna mendukung efisiensi energi smart building.

## VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. H. A. S. M. Ardita, "Design Scada Untuk Simulator Realtime Home Berbasis Iot," Vol. 07, Pp. 1–11, 2024.
- [2] A. F. Ragali, A. Soetedjo, F. Y. Limpraptono, And T. Elektro, "Sistem Manajemen Energi Listrik Berbasis



- Okupansi Menggunakan Teknologi Iot Di Laboratorium Otomasi Dan Robotika Teknik Elektro Itn Malang Amirul,” Vol. 08, Pp. 325–337, 2024.
- [3] T. Dubail, F. Alejandro, G. Pe, H. R. Medeiros, And C. V Sep, “Privacy-Preserving Person Detection Using Low-Resolution Infrared Cameras”.
- [4] M. R. Ramadhan, R. A. Wijaya, And A. Firdhayanti, “Rancang Bangun Pendingin Ruang Otomatis Menggunakan Mikrokontroler Dan Sensor Pir,” *Sienna*, Vol. 5, No. 2, Pp. 165–173, 2024, Doi: 10.47637/Sienna.V5i2.1645.
- [5] A. Setiawan, A. I. Purnamasari, A. Setiawan, And A. I. Purnamasari, “Pengembangan Passive Infrared Sensor ( Pir ) Hc-Sr501 Dengan Microcontrollers Esp32-Cam Berbasis Internet Of Things ( Iot ) Dan Smart Home Sebagai Deteksi Gerak Untuk Keamanan Perumahan,” *Pros. Sisoftek - Sist. Inf. Dan Teknol.*, Pp. 148–154, 2023.
- [6] R. S. 1 Sampurna Dadi Riskiono<sup>1</sup>, Doni Septiawan<sup>2</sup>, Amarudin<sup>3</sup>, “Implementasi Sensor Pir Sebagai Alat Peringatan Pengendara Terhadap Penyebrang Jalan Raya,” Vol. 8, No. 1, Pp. 55–64, 2018.
- [7] B. Shubha And V. V. D. Shastrimath, “Real-Time Occupancy Detection System Using Low-Resolution Thermopile Array Sensor For Indoor Environment,” *Ieee Access*, Vol. 10, No. December, Pp. 130981–130995, 2022, Doi: 10.1109/Access.2022.3229895.
- [8] A. Recognition And T. Preserves, “A Low-Resolution Infrared Array For Unobtrusive Human Activity Recognition That Preserves Privacy,” Pp. 1–16, 2024.
- [9] “Evaluation Of Occupancy Linghting Control Based On Low-Power Privacy-Preserving Sensor,” Pp. 209–216.
- [10] C. Perra, A. Kumar, M. Losito, P. Pirino, M. Moradpour, And G. Gatto, “Monitoring Indoor People Presence In Buildings Using Low-Cost Infrared Sensor Array In Doorways,” Pp. 1–19, 2021.
- [11] C. S. Miharjo *Et Al.*, “Analisis Efektivitas Sensor Termal Sebagai Alat Deteksi Keramaian Pada Suatu Gedung,” Vol. 2, No. 2, 2023.
- [12] W. O. S. N. Alam, A. N. Aliansyah, F. E. Larobu, L. Mulyawati, A. Asminar, And I. Galugu, “Tingkat Akurasi Sensor Amg8833 Dan Sensor Mlx90614 Dalam Mengukur Suhu Tubuh,” *Jtev (Jurnal Tek. Elektro Dan Vokasional)*, Vol. 8, No. 1, P. 169, 2022, Doi: 10.24036/Jtev.V8i1.114543.
- [13] Y. Lin And Q. Zhao, “Human Occupancy Monitoring And Positioning With Speed-Responsive Adaptive Sliding Window Using An Infrared Thermal Array Sensor,” *Sensors*, Vol. 25, No. 1, Pp. 1–21, 2025, Doi: 10.3390/S25010129.
- [14] M. Cokbas, P. Ishwar, And J. Konrad, “Low-Resolution Overhead Thermal Tripwire For Occupancy Estimation,” Vol. 4, Pp. 1–9, 2020.

## VII. BIODATA PENULIS



Muhammad Naufal Daffawaliy, lahir di Mataram, Nusa Tenggara Barat, 22 Januari 2004. Penulis menyelesaikan pendidikan di SMKN 3 Mataram pada tahun 2022. Kemudian pada tahun 2022 Penulis melanjutkan studi di perguruan tinggi swasta Institut Teknologi Nasional Malang Prodi Teknik Elektro S-1 dengan konsentrasi Teknik Elektronika Kendali dan Instrument. Selama di perkuliahan daffa mengikuti organisasi asisten laboratorium Otomasi Industri dan Robotika, Robtotika ITN Malang, dan Himpunan Mahasiswa Elektro. Email Daffa adalah [naufaldaffawaliy204@gmail.com](mailto:naufaldaffawaliy204@gmail.com)