Magnetika

https://ejournal.itn.ac.id/magnetika

Vol. 10 No. 2 pp. xx–xx November Year e-ISSN: 2597-7881

SISTEM DETEKSI OKUPANSI SUATU RUANGAN MENGGUNAKAN MULTI SENSOR

Fernando Dedhy Satria[1], Aryuanto Soetedjo[2], Ibrahim Ashari[3]
Teknik Elektro S-1, Institut Teknologi Nasional, Malang Indonesia
[1]Fernandodedhy@gmail.com, [2]aryuanto@lecturer.itn.ac.id, [3]ibrahim_ashari@lecturer.itn.ac.id[3]

Abstrak— Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan Sistem Deteksi Okupansi Menggunakan Multi Sensor berbasis mikrokontroler ESP32 yang terdiri dari sensor PIR, RCWL (Microwave Doppler Radar), dan CO_2 untuk meningkatkan akurasi deteksi keberadaan manusia. Metode penelitian meliputi perancangan perangkat keras, pemrograman ESP32, pengumpulan data sensor, dan penerapan logika *voting* 2-dari-3, yaitu ruangan dinyatakan *Occupied* apabila minimal dua sensor mendeteksi keberadaan manusia. Sensor PIR dan RCWL digunakan untuk mendeteksi pergerakan, sedangkan sensor CO_2 digunakan untuk mendeteksi keberadaan manusia dalam kondisi diam berdasarkan peningkatan konsentrasi karbon dioksida. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem multi sensor mampu meningkatkan akurasi dan stabilitas deteksi dibandingkan penggunaan sensor tunggal. Sensor CO_2 efektif mendeteksi keberadaan manusia dalam kondisi diam, sementara PIR dan RCWL optimal dalam mendeteksi pergerakan. Mekanisme *voting* membantu mengurangi *false positive* dan *false negative*. Hasil uji lapangan menunjukkan bahwa kombinasi ketiga sensor mampu mempertahankan kestabilan deteksi dengan ambang CO_2 di atas 800 ppm sebagai indikator keberadaan manusia. Sistem ini dapat diterapkan pada pengendalian lampu, ventilasi, dan manajemen energi berbasis IoT.

Kata Kunci: *Deteksi Okupansi, ESP32, PIR, RCWL, CO_2, Multi Sensor, Voting 2-dari-3.*

Abstract— This study aims to design and implement a Multi-Sensor Occupancy Detection System based on the ESP32 microcontroller, consisting of PIR, RCWL (Microwave Doppler Radar), and CO_2 sensors to improve human presence detection *accuracy*. The research methods include hardware design, ESP32 programming, sensor data collection, and the implementation of a 2-out-of-3 *voting* logic, in which a room is classified as *Occupied* when at least two sensors detect human presence. The PIR and RCWL sensors are used to detect movement, while the CO_2 sensor is used to detect human presence when a person remains stationary based on increased carbon dioxide concentration. The test results show that the multi-sensor system improves detection *accuracy* and stability compared to the use of a single sensor. The CO_2 sensor is effective in detecting stationary occupants, while the PIR and RCWL sensors perform optimally for motion detection. The *voting* mechanism helps reduce *false positive*s and *false negative*s. Field test results indicate that the combination of the three sensors maintains stable occupancy detection, with a CO_2 *threshold* above 800 ppm serving as an indicator of human presence. The system can be applied to lighting control, ventilation, and IoT-based energy management.

Keywords: Occupancy Detection, ESP32, PIR, RCWL, CO_2, Multi-Sensor, 2-out-of-3 *Voting*.

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Sistem manajemen energi berbasis okupansi bertujuan mengoptimalkan penggunaan energi dengan mendeteksi keberadaan manusia di dalam ruangan sehingga perangkat listrik dapat beroperasi sesuai kebutuhan. Teknologi ini banyak diterapkan pada bangunan seperti laboratorium dan perkantoran untuk meningkatkan efisiensi energi. Penelitian mengenai sistem deteksi manusia menggunakan kombinasi sensor PIR, RCWL, dan inframerah menunjukkan bahwa penggunaan beberapa sensor secara bersamaan mampu meningkatkan akurasi deteksi dibandingkan sensor tunggal [1]. Penerapan sistem okupansi juga telah digunakan pada penelitian "Sistem manajemen energi berbasis IoT di Laboratorium Otomasi dan Robotika ITN Malang" [2] serta pada "Sistem manajemen energi untuk lampu penerangan dan beban listrik di Laboratorium EBT ITN Malang" [3].

Namun, sensor PIR memiliki keterbatasan karena kurang efektif mendeteksi penghuni yang berada dalam kondisi diam. Oleh karena itu, sensor CO_2 mulai dimanfaatkan sebagai indikator keberadaan manusia

melalui pemantauan konsentrasi karbon dioksida di dalam ruangan [4]. Selain itu, penerapan sistem deteksi okupansi terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada bangunan [5]. Dalam pengembangannya, ESP32 banyak digunakan sebagai pengendali sistem multi sensor karena memiliki kemampuan pemrosesan yang baik, konektivitas nirkabel, dan konsumsi daya yang rendah [6].

Sensor RCWL berbasis gelombang mikro memiliki sensitivitas tinggi terhadap pergerakan dan mampu mendeteksi objek melalui penghalang tipis [7], sedangkan sensor CO_2 dapat digunakan untuk memperkirakan jumlah penghuni ruangan dengan tingkat akurasi yang baik [8]. Kajian terdahulu juga menunjukkan bahwa kombinasi berbagai jenis sensor menghasilkan estimasi okupansi yang lebih andal dibandingkan penggunaan sensor tunggal [9].

Selain itu, sensor radar Doppler mampu mendeteksi gerakan kecil yang sulit dideteksi sensor konvensional [10], sementara pemanfaatan data CO_2 dengan fitur temporal dapat meningkatkan akurasi deteksi keberadaan penghuni, terutama pada kondisi diam [11].

Penggunaan beberapa sensor dalam satu sistem memungkinkan penerapan *sensor fusion*, yaitu penggabungan informasi dari berbagai sensor untuk meningkatkan akurasi dan keandalan deteksi [12]. Pendekatan ini sesuai diterapkan pada sistem deteksi okupansi non-intrusif yang mendukung efisiensi energi dan menjaga privasi pengguna [13]. Informasi okupansi yang akurat juga berperan penting dalam pengelolaan pencahayaan, ventilasi, dan manajemen energi pada bangunan pintar [14]. Selain itu, konsentrasi CO_2 terbukti efektif digunakan sebagai indikator keberadaan penghuni sehingga semakin memperkuat pemanfaatan sensor CO_2 dalam sistem deteksi okupansi berbasis multi sensor [15].

Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, setiap sensor memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan sistem deteksi okupansi menggunakan kombinasi sensor PIR, RCWL, dan CO_2 berbasis ESP32 untuk meningkatkan akurasi deteksi keberadaan manusia baik dalam kondisi bergerak maupun diam.

.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

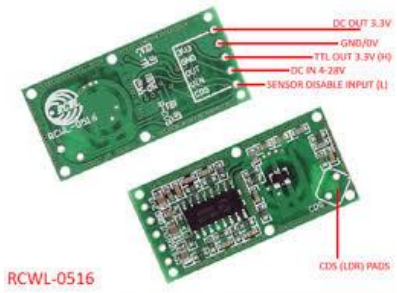
Berdasarkan referensi penelitian sebelumnya yang berjudul " Sistem manajemen energi listrik berbasis okupansi menggunakan teknologi iot di laboratorium otomasi industri dan robotika itn malang"[2] dan juga penelitian yang berjudul " Sistem manajemen energi untuk lampu penerangan dan beban peralatan listrik berbasi okupansi pada laboratorium EBT ITN Malang "[3]

Meskipun penggunaan sensor PIR memberikan solusi otomatis dalam pengelolaan energi, terdapat keterbatasan signifikan dalam hal keakuratan deteksi. Sensor PIR hanya mendeteksi pergerakan tubuh manusia dan tidak efektif dalam mendeteksi individu yang berada dalam posisi diam atau tidak bergerak. Oleh karena itu, sistem yang hanya mengandalkan sensor PIR akan kesulitan mendeteksi keberadaan manusia dalam kondisi tersebut.

Pada penelitian yang dilakukan oleh [2] dan [3], sistem deteksi okupansi yang mengandalkan sensor PIR terkadang mengabaikan orang yang diam dalam ruangan, yang mengarah pada ketidakakuratan deteksi dan penggunaan energi yang tidak efisien. Dalam kondisi seperti ini, lampu dan peralatan listrik akan tetap menyala meskipun ada orang yang duduk diam di dalam ruang tersebut.

B. RCWL Sensor

Sensor RCWL (Radar Continuous Wave Doppler) pada gambar 1 mendeteksi pergerakan dengan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan sensor PIR. Sensor ini juga dapat menembus bahan non-logam, seperti dinding tipis atau kain. Namun, sensor RCWL masih memiliki keterbatasan dalam membedakan jenis objek yang bergerak serta rentan terhadap interfensi gelombang radio lain [1],



Gambar 1. RCWL Sensor

Tabel 1. Spesifikasi RCWL Sensor

Parameter	Spesifikasi
Model	RCWL-0516 Microwave Radar Sensor
Tegangan Operasi	4.0 – 5.5 V DC
Arus Rata-rata	≈ 20 mA
Sinyal Output	Digital (High / Low)
Frekuensi Kerja	3.2 GHz
Rentang Deteksi	5 – 7 meter
Akurasi Deteksi	± 5 cm
Suhu Operasi	-20 – 85 °C
Kelembaban Operasi	≤ 95% RH
Dimensi Modul	43 mm x 20 mm

Tabel 1 spesifikasi teknis RCWL Sensor yang digunakan pada sistem deteksi okupansi multi sensor,informasi spesifikasi dapat dijadikan acuan dalam merangkai dan menggabungkan sensor.

C. *PIR Sensor*

Sensor PIR (Passive *Infrared*) pada gambar 2 adalah jenis sensor yang mendeteksi radiasi inframerah (IR) dari objek di sekitarnya, terutama panas tubuh manusia Disebut "passive" karena tidak memancarkan radiasi, hanya mendeteksi radiasi IR yang dipancarkan oleh objek. memiliki kelebihan biaya yang relatif lebih murah dan juga usia pakai yang cukup lama namun cakupan dari sensor ini terbatas, dan juga sensor ini tidak akan mendeteksi saat objek diam.[1][2][3],



Gambar 2. PIR Sensor

Tabel 2. Spesifikasi Pir Sensor

Parameter	Spesifikasi
Model	PIR Motion Sensor (Passive *Infrared* Sensor)
Tegangan Operasi	5V DC
Arus Rata-rata	≈ 10 mA
Sinyal Output	Digital (High / Low)
Frekuensi Kerja	12 Hz
Rentang Deteksi	3 – 7 meter
Akurasi Deteksi	± 5 cm
Suhu Operasi	-20 – 85 °C
Kelembaban Operasi	≤ 93% RH
Dimensi Modul	32 mm x 24 mm x 24 mm

Tabel 2 spesifikasi teknis Pir Sensor yang digunakan pada sistem deteksi okupansi, informasi spesifikasi dapat dijadikan acuan dalam merangkai dan menggabungkan sensor.

D. *CO2 Sensor*

Sensor CO_2 Gravity DFRobot pada gambar 3 adalah modul deteksi karbon dioksida yang menggunakan prinsip NDIR atau reaksi elektrokimia, dan dilengkapi dengan output analog, digital, I2C, atau UART. Sensor ini digunakan untuk memantau kualitas udara secara *real-time*.



Gambar 3. CO2 Sensor

Tabel 3. Spesifikasi CO_2 Sensor

Parameter	Spesifikasi
Model	Gravity: Analog Electrochemical CO_2 Sensor
Tegangan Operasi	3.7 – 5 V DC
Arus Rata-rata	< 1 W
Sinyal Output	Analog (2.7 – 4.1 V) + Digital (Alarm: 0 – VCC)
Rentang Pengukuran	0 – 10000 ppm CO_2
Akurasi	±100 ppm @ 400 ppm
Waktu Respons (T90)	< 20 detik
Suhu Operasi	-20 – 50 °C
Kelembaban Operasi	0 – 95% RH (tanpa kondensasi)
Umur Pakai	> 1 tahun
Dimensi Modul	32 mm × 42 mm

Tabel 3 spesifikasi teknis CO2 Sensor yang digunakan pada sistem deteksi okupansi, informasi spesifikasi dapat dijadikan acuan dalam merangkai dan menggabungkan sensor.

E. *ESP32*

ESP32 pada gambar 4 merupakan sebuah modul mikrokontroler dengan fitur mode ganda yakni WiFi dan bluetooth yang digunakan untuk mempermudah pengguna dalam membuat berbagai sistem aplikasi dan projek berbasis IoT (Internet of Things). Pada ESP32 terdapat inti CPU serta Wi-Fi yang lebih cepat, GPIO yang lebih banyak, dan dukungan terhadap Bluetooth 4.2, serta konsumsi daya yang rendah, sehingga sangat cocok untuk membuat beberapa proyek-proyek elektronika berbasis Internet of Things khusus pada project multi sensor ini.



Gambar 4. ESP 32

F. *Confusion Matrix*

Confusion matrix merupakan salah satu metode evaluasi yang umum digunakan untuk mengukur kinerja suatu model atau sistem klasifikasi, termasuk sistem deteksi okupansi yang bersifat klasifikasi biner (*occupied* dan *unoccupied*). Metode ini bekerja dengan cara membandingkan hasil prediksi atau pembacaan sistem terhadap kondisi aktual (*ground truth*) yang sebenarnya terjadi, sehingga dapat diketahui sejauh mana kesesuaian antara keluaran sistem dengan kondisi yang sesungguhnya [20], [21].

Secara umum, *confusion matrix* untuk kasus klasifikasi biner disusun dalam bentuk tabel berukuran 2×2 yang memuat

empat kemungkinan hasil klasifikasi, sebagaimana disajikan pada Tabel 4. Keempat kemungkinan tersebut dijelaskan sebagai berikut [22]:

Tabel 4. Struktur Umum *Confusion Matrix*

n = jumlah data	Aktual *Occupied*	Aktual *Unoccupied*
Prediksi *Occupied*	*True Positive* (TP)	*False Positive* (FP)
Prediksi *Unoccupied*	*False Negative* (FN)	*True Negative* (TN)

Keterangan :

a. *True Positive* (TP), yaitu jumlah data yang oleh sistem diprediksi *occupied* dan pada kenyataannya ruangan memang dalam kondisi *occupied*.
b. *True Negative* (TN), yaitu jumlah data yang oleh sistem diprediksi *unoccupied* dan pada kenyataannya ruangan memang dalam kondisi *unoccupied*.
c. *False Positive* (FP), yaitu jumlah data yang oleh sistem diprediksi *occupied* padahal kondisi sebenarnya adalah *unoccupied*.
d. *False Negative* (FN), yaitu jumlah data yang oleh sistem diprediksi *unoccupied* padahal kondisi sebenarnya adalah *occupied*.

Keempat nilai tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung beberapa metrik evaluasi kinerja sistem klasifikasi. Metrik yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Accuracy*, *Precision*, *Recall* (*Sensitivity*), *Specificity*, Negative Predictive Value (NPV), dan F1-Score, dengan formulasi umum sebagai berikut [20], [21]:

1. *Accuracy* menunjukkan proporsi keseluruhan prediksi yang benar (baik *occupied* maupun *unoccupied*) terhadap seluruh data yang diuji.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\% \quad (1)$$

2. *Precision* menunjukkan proporsi prediksi *occupied* yang benar-benar sesuai dengan kondisi aktual *occupied*, sehingga menggambarkan tingkat kepercayaan terhadap prediksi positif sistem.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\% \quad (2)$$

3. *Recall* atau *Sensitivity* menunjukkan kemampuan sistem dalam mengenali seluruh kondisi *occupied* yang sebenarnya terjadi, sehingga menggambarkan tingkat kelengkapan deteksi terhadap kondisi positif.

$$Recall\ (Sensitivity) = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\% \quad (3)$$

4. *Specificity* menunjukkan kemampuan sistem dalam mengenali seluruh kondisi *unoccupied* yang sebenarnya terjadi, sehingga menggambarkan tingkat kelengkapan deteksi terhadap kondisi negatif.

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \times 100\% \quad (4)$$

5. Negative Predictive Value (NPV) menunjukkan proporsi prediksi *unoccupied* yang benar-benar sesuai dengan kondisi aktual *unoccupied*.

$$NPV = \frac{TN}{TN + FN} \times 100\% \quad (5)$$

6. F1-Score merupakan rata-rata harmonik antara *Precision* dan *Recall* yang digunakan untuk memberikan gambaran keseimbangan kinerja sistem, khususnya pada kondisi jumlah data *occupied* dan *unoccupied* yang tidak seimbang (imbalanced).

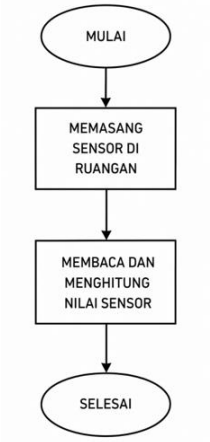
$$F1 - Score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \times 100\% \quad (6)$$

=
=]

III. METODE PENELITIAN

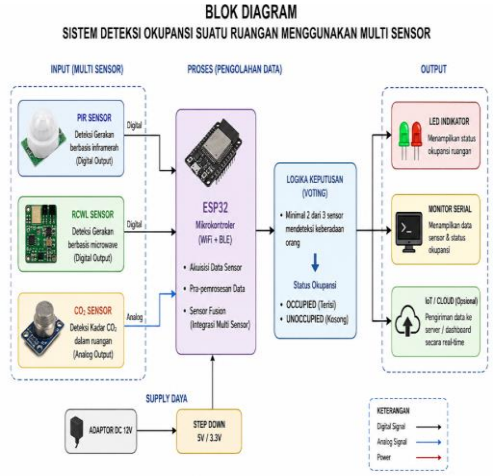
A. Diagram Alur Penelitian

Dalam pelaksanaan dan penyusunan penelitian ini, dibutuhkan suatu penulisan yang tersusun secara sistematis guna mempermudah setiap tahapan kerja dan proses yang dilakukan. Proses penelitian diawali dengan tahap perancangan dan pembuatan alat deteksi okupansi. Setelah alat berhasil dirancang, tahap berikutnya adalah instalasi alat serta memastikan sistem dapat beroperasi dengan baik. Selanjutnya, dilakukan proses pengumpulan data yang diperlukan untuk mendukung penelitian. Data yang telah dikumpulkan kemudian dianalisis untuk memperoleh pemahaman dan hasil yang relevan,pada gambar 5 terdapat diagram alur penilitian.



Gambar 5. Diagram alur

B. Blok Diagram Rangkaian



Gambar 6. Blok Diagram

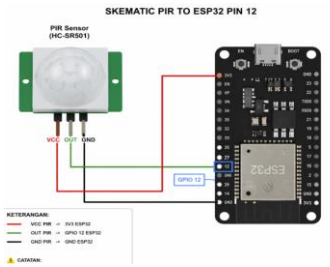
Blok diagram sistem pada gambar 6 digunakan untuk menggambarkan proses kerja alat deteksi okupansi ruangan secara keseluruhan. Sistem yang dirancang terdiri dari tiga bagian utama, yaitu bagian masukan (input), bagian pengolahan data (process), dan bagian keluaran (output). Pada bagian input digunakan tiga jenis sensor yang memiliki fungsi berbeda, yaitu sensor PIR, sensor RCWL, dan sensor CO_2. Ketiga sensor tersebut bekerja secara bersamaan untuk mendeteksi keberadaan manusia di dalam ruangan.

Data hasil pembacaan sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan metode *sensor fusion*.Setelah proses pengolahan data selesai,system akan menentukan kondisi ruangan apakah dalam kondisi *occupied* atau *unoccupied* dan hasil ditampilkan melalui *serial monitor*

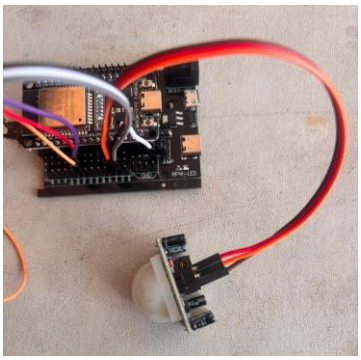
C. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan sistem mencakup tiga komponen utama, yaitu input, proses, dan output. Input berfungsi sebagai pengirim sinyal, proses berperan sebagai pengolah data sesuai apa yang sudah diprogram, sedangkan output menghasilkan data yang telah diproses

1) Sensor PIR



Gambar 7. Skematic PIR Sensor



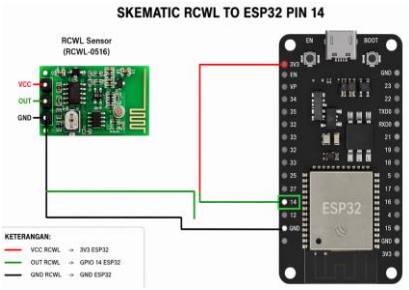
Gambar 8. Wiring PIR Sensor

Sensor PIR pada gambar 7 dan 8 mendeteksi perubahan radiasi *infrared* yang dihasilkan oleh panas tubuh manusia,Saat seseorang bergerak di depan sensor maka radiasi *infrared* berubah dan sensor memberikan sinyal digital HIGH (1) ke esp32

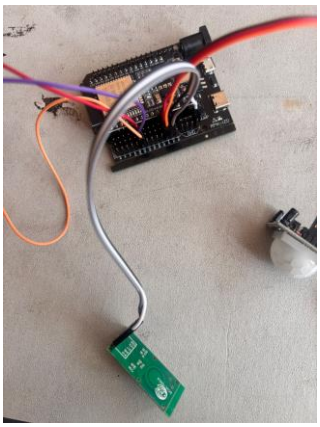
1. VCC dihubungkan ke 3,3 V ESP32 daya
2. OUT terhubung ke pin digital 12 (Pin_PIR) untuk membaca sinyal Gerakan
3. GND dihubungkan ke ground ESP32
4. Output digital akan HIGH saat terdeteksi Gerakan dan LOW saat tidak ada Gerakan

Berikut kelebihan dari sensor PIR adalah konsumsi daya rendah,tidak memancarkan gelombang sendiri,hanya mendekti radiasi pasif dan efektif untuk mendeteksi keberadaan manusia

2) Sensor RCWL



Gambar 9. Skematik RCWL Sensor

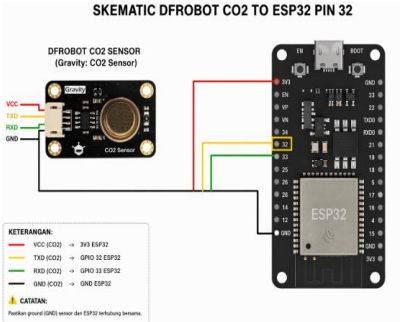


Gambar 10. Wiring RCWL Sensor

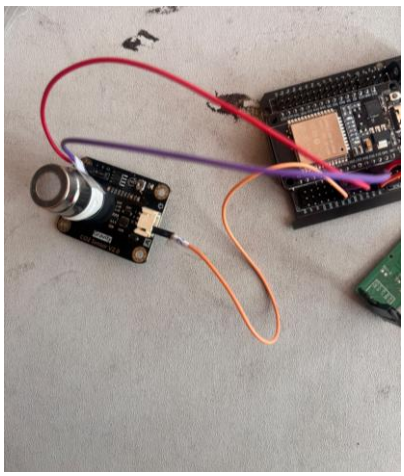
Fungsi utama sensor pada gambar 9 dan 10 ini Adalah mendeteksi pergerakan berbasis gelombang micro (doppler radar) berbeda dengan sensor PIR,sensor ini dapat mendeteksi Gerakan dibalik bahan tipis seperti kaca atau plastic,berikut beberapa point penting sensor RCWL

1. VCC dihubungkan ke 3.3V ESP 32
2. OUT terhubung ke pin digital 14 (pin_RCWL) untuk membaca status deteksi
3. GND dihubungkan ke ground ESP32
4. Output Digital HIGH saat ada Gerakan dan Low saat tidak ada Gerakan

3) Sensor CO2



Gambar 11. Skematic CO2 Sensor



Gambar 12. Wiring CO2 Sensor

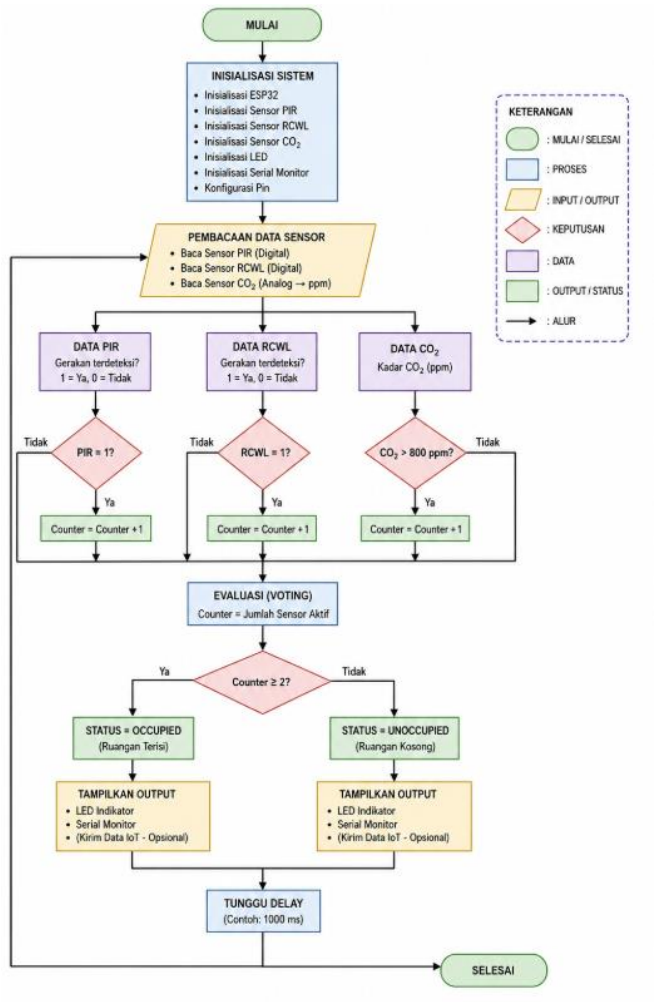
Fungsi utama sensor pada gambar 11 dan 12 adalah mengukur konsentrasi gas CO2 di udara dalam satuan ppm (part per million), peningkatan kadar CO2 dapat mengindikasikan adanya manusia didalam ruangan,berikut beberapa point penting sensor CO2

1. VCC dihubungkan ke 3V ESP32
2. GND dihubungkan ke Ground ESP32
3. AOUT dihubungkan ke pin analog 32 (CO2_PIN) untuk pembacaan nilai tegangan sensor

Terdapat beberapa kelebihan dari sensor ini yaitu mampu mendeteksi keberadaan manusia secara tidak langsung tanpa Gerakan dan berguna juga untuk ruangan tertutup,namun memiliki beberapa keterbatasan yaitu memerlukan kalibrasi rutin agar akurat dan respon yang lambat terhadap perubahan yang cepat serta sensitive terhadap suhu dan kelembapan

D. Flowchart Sistem Deteksi Okupansi

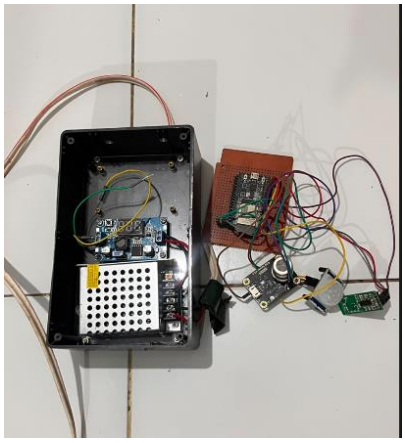
Pada Gambar *flowchart* 13 merupakan *flowchart* sensor yang akan dibuat, terdapat 3 sensor utama dengan menggunakan logika 2 atau lebih sensor yang mendeteksi manusia untuk menyatakan status *occupied*



Gambar 13. *Flowchart* Sistem

IV. SIMULASI DAN ANALISA

A. Implementasi Perangkat Keras



Gambar 14. Tampilan Alat



Gambar 15. Tampilan Pemasangan Alat

Pada gambar 14 dan 15 terdapat beberapa komponen yaitu Power Suplly 12V, ESP32, Step Down 12V-5V, Sensor PIR, Sensor RCWL,dan Sensor CO2

B. Pengujian Jarak Deteksi Sensor

Sebelum dilakukan uji coba sistem secara keseluruhan, masing-masing sensor diuji secara terpisah untuk mengetahui jarak deteksi efektifnya. Pengujian sensor PIR dan RCWL dilakukan pada jarak 1–7 meter dengan interval 1 meter, sebanyak 10 kali percobaan (P1–P10) pada tiap jarak. Tanda "1" menunjukkan sensor berhasil mendeteksi dan "0" menunjukkan sensor tidak mendeteksi.

Tabel 5. Uji Coba Jarak Deteksi Sensor PIR

Jarak	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Berhasil	Tidak	Deteksi
1 m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0	100 %
2 m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0	100 %
3 m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	9	1	90%
4 m	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	7	3	70%
5 m	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3	7	30%
6 m	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	10%
7 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0%

Pada tabel 5 sensor PIR mempertahankan tingkat keberhasilan deteksi di atas 90% hingga jarak 3 meter, kemudian menurun tajam pada jarak yang lebih jauh hingga 0% pada jarak 7 meter. Dengan batas keberhasilan minimal 90%, jarak deteksi efektif PIR adalah 3 meter.

Tabel 6. Uji Coba Jarak Deteksi Sensor RCWL

Jarak	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Berhasil	Tidak	Deteksi
1 m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0	100 %
2 m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0	100 %
3 m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0	100 %
4 m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0	100 %
5 m	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	7	3	70%
6 m	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	6	4	60%
7 m	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	3	7	30%

Pada tabel 6 sensor RCWL mempertahankan keberhasilan deteksi 100% hingga jarak 4 meter dan masih mendeteksi hingga jarak 7 meter meskipun akurasinya menurun. Dengan batas keberhasilan minimal 90%, RCWL memiliki jarak deteksi efektif hingga 4 meter, lebih jauh dibandingkan sensor PIR.

Tabel 7. Uji Coba Sensor CO_2 terhadap Jumlah Orang dalam Ruangan (6 m × 3 m)

Kondisi	Rentang (ppm)	Rata-rata (ppm)	Status
0 orang	695 – 706	700,6	Tidak Aktif
1 orang	797 – 806	801,5	Aktif
2 orang	875 – 887	880,6	Aktif
3 orang	955 – 967	960,6	Aktif
4 orang	1035 – 1047	1040,6	Aktif

Pada tabel 7 pengujian sensor CO_2 dilakukan dengan memvariasikan jumlah orang dalam ruangan berukuran 6 m × 3 m. Pada kondisi kosong, konsentrasi CO_2 rata-rata 700,6 ppm, masih di bawah ambang batas sistem sebesar 800 ppm sehingga status Tidak Aktif. Sejak terdapat satu orang, rata-rata konsentrasi meningkat menjadi 801,5 ppm dan terus naik seiring bertambahnya jumlah penghuni hingga 1040,6 ppm pada 4 orang, sehingga status berubah menjadi Aktif. Hasil ini menunjukkan hubungan positif antara jumlah penghuni dan konsentrasi CO_2 di dalam ruangan.

Berdasarkan ketiga pengujian di atas, sensor PIR unggul untuk deteksi jarak dekat, sensor RCWL memiliki jangkauan deteksi yang lebih jauh, sedangkan sensor CO_2 bekerja berdasarkan akumulasi gas sehingga tidak bergantung pada jarak namun pada durasi dan jumlah penghuni. Karakteristik yang saling melengkapi ini menjadi dasar penggunaan ketiga sensor secara bersamaan dalam sistem.

C. Implementasi Perangkat Lunak

```
 agar sesuai dengan yang penulis inginkan
#include <math.h>

// Konfigurasi pin sensor
#define CO2_PIN 32    // Pin ADC untuk sensor CO2
#define PIN_PIR 12    // Pin digital untuk sensor PIR
#define PIN_RCWL 14    // Pin digital untuk sensor RCWL
#define PIN_LED 2      // Pin LED indikator

// Ambang batas
#define CO2_THRESHOLD 800  // ppm

void setup() {
  Serial.begin(115200);

  // Inisialisasi pin
  pinMode(PIN_PIR, INPUT);
  pinMode(PIN_RCWL, INPUT);
  pinMode(PIN_LED, OUTPUT);
}
void loop() {
  // Baca sensor PIR dan RCWL
  int pir_value = digitalRead(PIN_PIR);
  int rcwl_value = digitalRead(PIN_RCWL);

 // Baca sensor CO2
  int sensorValue = analogRead(CO2_PIN);
  delay(10);  // Stabilkan pembacaan ADC
  float voltage = sensorValue * (3.3 / 4095.0);
  float co2_ppm = fmax(0.0, (voltage - 0.4) * 4000 / 2.0);

  // Tampilkan nilai sensor
  Serial.print("PIR: ");
  Serial.print(pir_value);
  Serial.print(" | RCWL: ");
  Serial.print(rcwl_value);
  Serial.print(" | CO2 (ppm): ");
  Serial.println(co2_ppm);

  // Hitung jumlah sensor yang aktif
  int counter = 0;
  if (pir_value == HIGH) counter++;
  if (rcwl_value == HIGH) counter++;
  if (co2_ppm >= CO2_THRESHOLD) counter++;

  // Tentukan status okupansi
  String occupancy_status = (counter >= 2) ? "Occupied" : "Unoccupied";

  // Tampilkan status okupansi
  Serial.print("Occupancy Status: ");
  Serial.println(occupancy_status);

  // Indikasi dengan LED
  digitalWrite(PIN_LED, (occupancy_status == "Occupied") ? HIGH : LOW);

  delay(5000);  // Tunggu 5 detik sebelum iterasi berikutnya
 }
```

1) Kesimpulan Logika Program

- Sistem membaca nilai dari tiga sensor berbeda
- Mengolah data CO_2 untuk mendeteksi keberadaan manusia diam
- Menggunakan logika *voting* antara tiga sensor untuk keputusan final
- Memberikan indikasi visual (LED) dan laporan digital (*Serial Monitor*)
- Memiliki penundaan waktu agar status ruang tidak berubah terlalu cepat

D. Uji Coba Sistem

Setelah alat dan program selesai diimplementasikan, dilakukan uji coba secara *real-time* pada ruangan Laboratorium Otomasi dan Robotika ITN Malang. Pengujian dilakukan selama satu hari kerja dengan 26 kali pengambilan data, membandingkan status yang dibaca sistem (STATUS) terhadap kondisi sebenarnya (REAL). Evaluasi akurasi masing-masing sensor dilakukan menggunakan metode *Confusion Matrix*, yaitu *True Positive* (TP), *True Negative* (TN), *False Positive* (FP), dan *False Negative* (FN).

1) Sensor PIR

Tabel 8. Data Pengujian Sensor PIR (30 November 2025)

Waktu	PIR	Status	Real
10.30	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.35	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.40	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.45	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.50	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.00	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.05	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.10	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.25	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.30	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.35	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.40	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.45	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.00	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.10	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.20	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.30	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.40	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.50	0	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.00	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.10	0	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.20	0	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.30	0	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.40	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
13.45	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
14.00	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*

Tabel 9. *Confusion Matrix* Sensor PIR

	Real *Occupied*	Real *Unoccupied*
Prediksi *Occupied*	15 (TP)	0 (FP)
Prediksi *Unoccupied*	4 (FN)	7 (TN)

Tabel 8 sensor PIR menghasilkan Akurasi = 84.62%, *Precision* = 100%, *Recall* = 78.95%, *Specificity* = 100%, NPV = 63.6%, F1-Score = 88.2%. *Precision* 100% menunjukkan tidak ada *False Positive*, namun *recall* yang lebih rendah menunjukkan PIR gagal mendeteksi penghuni pada beberapa kondisi diam (pukul 12.50, 13.10, 13.20, dan 13.30), sesuai dengan sifat sensor yang hanya peka terhadap perubahan radiasi inframerah akibat pergerakan.

Tabel 9 menunjukan *confusion matrix* dimana 15TP, 4 FN, 0 FP, 7 TN

2) Sensor RCWL

Tabel 10. Data Pengujian Sensor RCWL (30 November 2025)

Waktu	RCWL	Status	Real
10.30	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.35	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.40	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.45	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.50	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.00	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.05	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.10	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.25	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.30	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.35	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.40	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.45	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.00	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.10	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.20	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.30	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.40	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.50	0	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.00	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.10	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.20	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.30	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.40	1	*OCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
13.45	1	*OCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
14.00	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*

Tabel 10 sensor RCWL menghasilkan Akurasi = 88.46%, *Precision* = 90%, *Recall* = 94.74%, *Specificity* = 71.43%, NPV = 83.33%, F1-Score = 92.3%. Dua kejadian *False Positive* terjadi pada pukul 13.40 dan 13.45 akibat sensitivitas RCWL terhadap gerakan non-manusia, sedangkan satu *False Negative* pada pukul 12.50 menunjukkan RCWL tetap memiliki keterbatasan saat penghuni benar-benar diam.

Tabel 11. *Confusion Matrix* Sensor RCWL

	Real *Occupied*	Real *Unoccupied*
Prediksi *Occupied*	18 (TP)	2 (FP)
Prediksi *Unoccupied*	1 (FN)	5 (TN)

Tabel 11 menujukan *confusion matrix* terdapat 18 TP, 1 FN, 2 FP, 5 TN

3) Sensor CO2

Tabel 12. Data Pengujian Sensor CO_2 (30 November 2025)

Waktu	CO2	Status	Real
10.30	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.35	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.40	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.45	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.50	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.00	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.05	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.10	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.25	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.30	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.35	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.40	1	*OCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.45	1	*OCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.00	1	*OCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.10	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.20	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.30	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.40	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.50	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.00	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.10	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*

Waktu	CO2	Status	Real
13.20	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.30	0	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.40	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
13.45	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
14.00	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*

Tabel 13. *Confusion Matrix* Sensor CO_2

	Real *Occupied*	Real *Unoccupied*
Prediksi *Occupied*	19 (TP)	3 (FP)
Prediksi *Unoccupied*	1 (FN)	3 (TN)

Tabel 12 Sensor CO_2 menghasilkan Akurasi = 84.62%, *Precision* = 86.36%, *Recall* = 95%, *Specificity* = 50%, NPV = 75%, F1-Score = 90.48%. Tiga kejadian *False Positive* (11.40–12.00) terjadi karena konsentrasi CO_2 belum sempat turun meskipun ruangan sudah kosong, sedangkan satu *False Negative* (13.30) terjadi karena ventilasi menurunkan kadar CO_2 lebih cepat dari kondisi ruangan yang sebenarnya masih ditempati. Karakteristik respons yang lambat ini menjadi alasan sensor CO_2 tidak digunakan sebagai indikator tunggal.

4) PIR dan RCWL

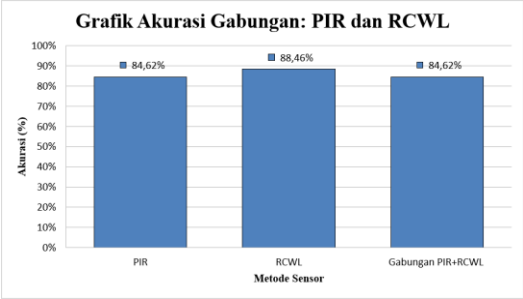
Tabel 14. Data Pengujian Kombinasi Sensor PIR dan RCWL(30 November 2025)

Waktu	PIR	RCWL	Status	Real
10.30	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.35	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.40	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.45	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.50	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.00	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.05	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.10	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.25	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.30	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.35	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.40	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.45	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.00	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.10	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.20	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.30	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.40	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.50	0	0	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.00	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.10	0	1	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.20	0	1	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.30	0	1	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.40	0	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
13.45	0	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
14.00	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*

Tabel 15. *Confusion Matrix* Kombinasi Sensor PIR dan RCWL

	Real *Occupied*	Real *Unoccupied*
Prediksi *Occupied*	15 (TP)	0 (FP)
Prediksi *Unoccupied*	4 (FN)	7 (TN)

Tabel 15 Kombinasi Sensor PIR dan RCWL menghasilkan Akurasi = 84.62%, *Precision* = 100%, *Recall* = 78.95%, *Specificity* = 100%, NPV = 63.63%, F1-Score = 88.24%. Pada gambar 14, kombinasi sensor PIR dan RCWL menghasilkan tingkat akurasi sebesar 84.62%, sama dengan akurasi sensor PIR secara individual. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan dua sensor gerak saja belum mampu meningkatkan performa sistem secara signifikan



Gambar 14. Grafik Akurasi Sensor PIR dan RCWL

5) RCWL dan CO2

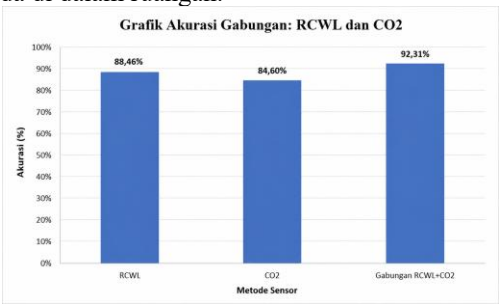
Tabel 16. Data Pengujian Kombinasi Sensor PIR dan RCWL(30 November 2025)

Waktu	RCWL	CO2	Status	Real
10.30	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.35	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.40	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.45	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.50	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.00	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.05	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.10	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.25	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.30	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.35	0	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.40	0	0	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.45	0	0	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.00	0	0	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.10	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.20	1	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.30	1	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.40	1	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.50	0	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
13.00	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.10	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.20	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.30	1	0	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.40	1	0	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.45	1	0	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
14.00	0	0	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*

Tabel 17. *Confusion Matrix* Kombinasi Sensor RCWL dan CO2

	Real *Occupied*	Real *Unoccupied*
Prediksi *Occupied*	17 (TP)	0 (FP)
Prediksi *Unoccupied*	2 (FN)	7 (TN)

Tabel 16 Kombinasi Sensor PIR dan RCWL menghasilkan Akurasi = 92.31%, *Precision* = 100%, *Recall* = 89.47%, *Specificity* = 100%, NPV = 77.78%, F1-Score = 94.44%. Pada gambar 15, kombinasi sensor RCWL dan CO2 menghasilkan tingkat akurasi sebesar 92.31% Nilai ini masih relatif rendah karena sensor RCWL memiliki keterbatasan dalam mendeteksi manusia yang tidak bergerak, sedangkan sensor CO_2 memiliki waktu respons yang lebih lambat terhadap perubahan kadar karbon dioksida di dalam ruangan.



Gambar 15. Grafik Akurasi Sensor RCWL dan CO2

6) PIR dan CO2

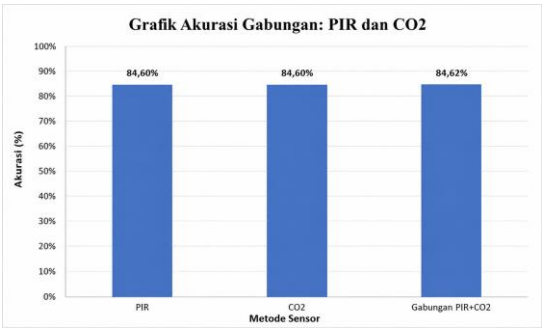
Tabel 18. Data Pengujian Kombinasi Sensor PIR dan RCWL(30 November 2025)

Waktu	PIR	CO2	Status	Real
10.30	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.35	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.40	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.45	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.50	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.00	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.05	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.10	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.25	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.30	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.35	0	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.40	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.45	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.00	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.10	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.20	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.30	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.40	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.50	0	1	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.00	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.10	0	1	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.20	0	1	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.30	0	0	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.40	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
13.45	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
14.00	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*

Tabel 19. *Confusion Matrix* Kombinasi Sensor RCWL dan CO2

	Real *Occupied*	Real *Unoccupied*
Prediksi *Occupied*	15 (TP)	0 (FP)
Prediksi *Unoccupied*	4 (FN)	7 (TN)

Tabel 18 kombinasi Sensor PIR dan CO2 menghasilkan Akurasi = 84.62%, *Precision* = 100%, *Recall* = 78.95%, *Specificity* = 100%, NPV = 63.64%, F1-Score = 88.24%. Pada gambar 16, kombinasi sensor RCWL dan CO2 menghasilkan tingkat akurasi sebesar 84.62% %. Nilai ini masih relatif rendah karena sensor PIR memiliki keterbatasan dalam mendeteksi manusia yang tidak bergerak, sedangkan sensor CO_2 memiliki waktu respons yang lebih lambat terhadap perubahan kadar karbon dioksida di dalam ruangan.



Gambar 16. Grafik Akurasi Sensor PIR dan CO2

7) Gabungan

Tabel 20. Data Pengujian Sistem Gabungan (30 November 2025)

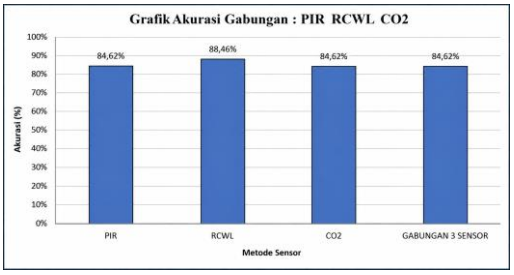
Waktu	PIR	RCWL	CO2	Status	Real
10.30	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.35	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.40	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.45	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.50	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.00	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.05	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.10	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.25	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.30	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.35	0	0	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.40	0	0	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.45	0	0	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.00	0	0	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.10	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.20	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.30	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.40	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*

12.50	0	0	1	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.00	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.10	0	1	1	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.20	0	1	1	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.30	0	1	0	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.40	0	1	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
13.45	0	1	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
14.00	0	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*

Tabel 21. *Confusion Matrix* Sistem *Voting* 2-dari-3

	Real *Occupied*	Real *Unoccupied*
Prediksi *Occupied*	15 (TP)	0 (FP)
Prediksi *Unoccupied*	4 (FN)	7 (TN)

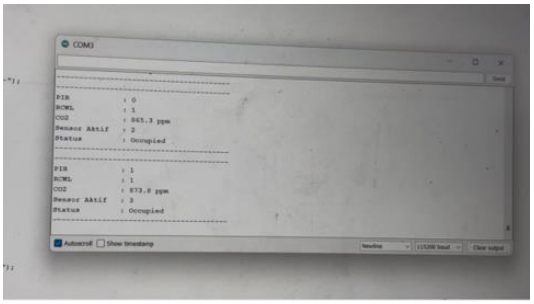
Tabel 20 sistem gabungan menghasilkan Akurasi = 84.62%, *Precision* = 100%, *Recall* = 78.95%, *Specificity* = 100%, NPV = 63.64%, F1-Score = 88.24%. Pada gambar 17 menunjukkan perbandingan akurasi deteksi okupansi antara sensor PIR, RCWL, CO2 secara individual dengan hasil gabungan ketiga sensor menggunakan logika AND, di mana status *occupied* hanya tercapai jika ketiga sensor kompak bernilai 1. Sensor CO2 memiliki akurasi tertinggi 96,15%, diikuti RCWL 92,31%, sedangkan PIR dan gabungan AND sama-sama menghasilkan akurasi terendah, yaitu 84,62%.



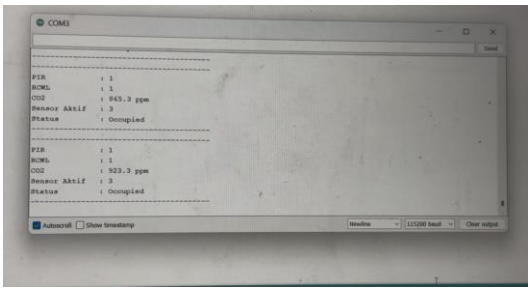
Gambar 17. Grafik Akurasi Sensor Gabungan

8) Voting 2 dari 3

Pada metode akhir, status okupansi ditentukan menggunakan logika *voting*: ruangan dinyatakan *Occupied* apabila minimal dua dari tiga sensor (PIR, RCWL, CO_2) aktif secara bersamaan. Gambar 18 dan 19 menunjukkan tampilan *serial monitor* hasil uji coba langsung pada ruangan pengujian.



Gambar 18. Tampilan *Serial Monitor* Sistem



Gambar 19. Tampilan *Serial Monitor* Sistem

Tabel 22. Data Pengujian Sistem Gabungan – *Voting* 2-dari 3 (30 November 2025)

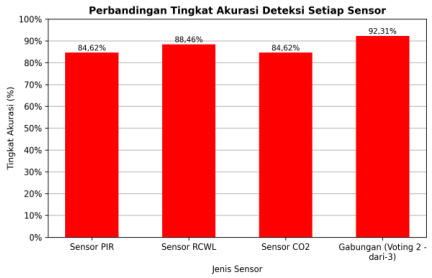
Waktu	PIR	RCWL	CO2	Status	Real
10.30	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.35	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.40	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.45	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
10.50	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.00	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.05	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.10	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.25	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.30	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
11.35	0	0	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.40	0	0	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
11.45	0	0	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.00	0	0	1	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
12.10	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.20	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.30	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.40	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
12.50	0	0	1	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.00	1	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.10	0	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.20	0	1	1	*OCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.30	0	1	0	*UNOCCUPIED*	*OCCUPIED*
13.40	0	1	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
13.45	0	1	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*
14.00	0	0	0	*UNOCCUPIED*	*UNOCCUPIED*

Tabel 23. *Confusion Matrix* Sistem *Voting* 2-dari-3

	Real *Occupied*	Real *Unoccupied*
Prediksi *Occupied*	17 (TP)	0 (FP)
Prediksi *Unoccupied*	2 (FN)	7 (TN)

Tabel 22 sistem *voting* 2-dari-3 menghasilkan Akurasi = 92.31%, *Precision* = 100%, *Recall* = 89.47%, *Specificity* = 100%, NPV = 77.78%, F1-Score = 94.44%. *Precision* 100%

menunjukkan tidak ada status *Occupied* yang salah, sedangkan dua *False Negative* (pukul 12.50 dan 13.30) terjadi karena hanya satu sensor yang aktif saat itu sehingga aturan *voting* menyatakan ruangan kosong. Hasil ini membuktikan bahwa metode *sensor fusion* melalui *voting* 2-dari-3 mampu meningkatkan akurasi deteksi dibandingkan penggunaan sensor tunggal maupun logika AND ketiga sensor. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 20.



Gambar 20. Grafik Perbandingan Akurasi Sensor Tunggal dan Metode Gabungan

E. Analisis Perbandingan Metode

Untuk mengetahui kontribusi setiap sensor terhadap performa sistem, dilakukan analisis tambahan dengan menghitung akurasi deteksi untuk seluruh kemungkinan kombinasi sensor, meliputi sensor tunggal, kombinasi dua sensor, kombinasi tiga sensor dengan logika AND, serta metode *voting* 2-dari-3. Rekapitulasi hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 24.

Tabel 24. Tabel Perbandingan Metode Okupansi

No	Metode	Akurasi	*Precision*	*Recall*	*Specificity*	NPV	F1-Score
1	PIR	84,6	100	78,95	100	63,6	88,2
2	CO_2	84,6	86,36	95	50	75	90,48
3	RCWL	88,5	90	94,74	71,43	83,33	92,3
4	PIR + CO_2	84,6	100	78,95	100	63,64	88,24
5	PIR + RCWL	84,6	100	78,95	100	63,63	88,24
6	CO_2 + RCWL	92,3	100	89,47	100	77,78	94,44
7	PIR+CO_2+RCWL (AND)	84,6	100	78,95	100	63,64	88,24
8	2 dari 3 (*Voting*)	92,3	100	89,47	100	77,78	94,44

Tabel 24 Pada pengujian sensor tunggal, sensor RCWL memberikan akurasi tertinggi (88,5%) dibandingkan PIR dan CO_2 yang sama-sama menghasilkan 84,6%. Kombinasi dua sensor tidak selalu meningkatkan performa: PIR+RCWL dan PIR+CO_2 tetap menghasilkan akurasi 84,6% karena kedua kombinasi tersebut masih dibatasi oleh kelemahan PIR dalam mendeteksi objek diam. Sebaliknya, kombinasi CO_2+RCWL meningkatkan akurasi secara signifikan menjadi 92,3% karena kedua sensor saling melengkapi—RCWL unggul pada deteksi gerak sedangkan CO_2 unggul pada deteksi kondisi diam.

Kombinasi tiga sensor dengan logika AND (ketiganya harus aktif bersamaan) hanya menghasilkan akurasi 84,6%, karena logika ini bersifat konservatif dan mengikuti performa sensor terlemah dalam kombinasi—kegagalan satu sensor saja sudah cukup membuat status gabungan salah. Sebaliknya, metode *voting* 2-dari-3 menghasilkan akurasi tertinggi di antara seluruh metode yang diuji, yaitu 92,3%, dengan F1-Score 94,44%. Metode ini lebih toleran terhadap kegagalan satu sensor karena keputusan akhir tetap dapat diambil dari dua sensor lain yang mendeteksi dengan benar, sehingga metode *voting* 2-dari-3 dipilih sebagai metode akhir sistem deteksi okupansi pada penelitian ini.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem deteksi okupansi menggunakan multi-sensor yang terdiri dari sensor PIR, sensor RCWL, dan sensor CO_2 berbasis mikrokontroler ESP32, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Sistem deteksi okupansi multi-sensor terbukti mampu meningkatkan akurasi pendeteksian keberadaan manusia dibandingkan penggunaan satu sensor tunggal. Kombinasi PIR (*infrared* motion), RCWL (microwave motion), dan CO_2 (indikasi metabolisme manusia) menghasilkan mekanisme validasi silang (*sensor fusion*) yang dapat mengurangi kesalahan deteksi akibat kelemahan tiap sensor.
- Penggunaan metode *voting* 2-dari-3 (two-out-of-three validation) pada program mampu memberikan hasil deteksi yang lebih stabil. Ruangan dinyatakan "*Occupied*" apabila minimal dua sensor memberikan sinyal keberadaan, sehingga false-positive akibat *noise* (misalnya PIR sensitif terhadap panas, atau RCWL menangkap gerakan di balik dinding tipis) dapat diminimalkan.
- Sensor CO_2 memberikan kontribusi signifikan terhadap deteksi keberadaan manusia yang sedang diam (low-motion occupants). Ketika PIR dan RCWL tidak mendeteksi gerakan, peningkatan kadar CO_2 di atas ambang batas 800 ppm dapat mengindikasikan adanya aktivitas metabolik manusia di dalam ruangan sehingga sistem tetap dapat mendeteksi keberadaan penghuni.

Saran Untuk pengembangan lebih lanjut pada penelitian ini, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

- Melakukan pengujian di berbagai skenario ruangan, seperti ruangan kecil, kelas, ruang rapat, dan area publik, untuk mendapatkan model okupansi yang

lebih komprehensif dan meningkatkan akurasi *threshold*.

- Melakukan lebih banyak pengambilan data agar mengetahui kelemahan system secara akurat
- Menghubungkan system ke platform iot untuk monitoring system deteksi okupansi secara realtime

PERNYATAAN

Pernyataan Penggunaan Kecerdasan Artifisial

Penulis menggunakan Gemini, Cloude.ai untuk membantu pemeriksaan tata bahasa dan penyuntingan awal. Seluruh isi, analisis, dan kesimpulan artikel menjadi tanggung jawab penulis.

Kontribusi Penulis

Setiap penulis memberikan kontribusi sesuai dengan peran dalam perumusan penelitian, pelaksanaan penelitian, analisis hasil, dan penyusunan artikel.

Pendanaan

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan dari pihak eksternal.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan yang berkaitan dengan penelitian dan publikasi artikel ini.

VI. DAFTAR PUSTAKA

[1] A.W.W.N.A.F. Aldi Setia Pramuda, "Perancangan Sistem Deteksi Manusia Menggunakan Sensor PIR, RCWL, dan *Infrared*," Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia (JPTI) , pp. 1-10, 2023

[2] A.F.R.S.Y. Limpraptono3, "sistem manajemen energi listrik berbasis okupansi menggunakan teknologi iot di laboratorium otomasi dan robotika itn malang "," Institut teknologi nasional malang, pp. 1-13, 2024.

[3] Sofyan, "Sistem Manajemen energi untuk lampu penerangan dan beban peralatan listrik berbasis okupansi di laboratorium ebt ITN Malang," Magnetika, pp. 1-11, 2023.

[4] R.L.I.H.P.Hardian Setya Dharma Putra," Pemantuan Kualitas Udara Polutan Gas CO Dan CO2 Berbasis Iot" Jurnal Teknik Elektro,, vol. 2, pp. 1-6, 1 maret 2019.

[5] R.F.a.H.Hambali, "“Sistem Otomasi Penyalaan Lampu dan AC (Air Conditioner) pada Ruang Dosen Berbasis Arduino Uno,”," JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional), , vol. vol.6 no 2, pp. 145-152, 2020. ESP32.

[6] A.Maier,A.Sharp andY .Vagapov, "Comparative analysis and practical implementation of the microcontroller module for the internet of th ings," 2021 Internet Technologies and Applications (ITA), Wrexham, UK, 2017, pp. 143 148,

[7] Q. R. U. M. H. &. F. A. (. Aini, "Rancang bangun alat monitoring pergerakan objek pada ruangan menggunakan modul RCWL 0516," Jurnal Teknik Elektro, pp. 41-46, 2020.

[8] Wei, Y., Wang, S., Jin, L., Xu, Y., & Ding, T. (2022). Indoor occupancy estimation from carbon dioxide concentration using parameter estimation algorithms. Building Services Engineering Research and Technology, 43(4), 419-438.

[9] Mena, A. R., Ceballos, H. G., & Alvarado-Uribe, J. (2022). Measuring indoor occupancy through environmental sensors: A systematic review on sensor deployment. Sensors, 22(10), 3770.

[10] Whitworth, A., Droitcour, A., Song, C., Boric-Lubecke, O., & Lubecke, V. (2023). Characterization technique for a Doppler radar occupancy sensor. Electronics, 12(24), 4888.

[11] Kańtoch, E., & Augustyniak, P. (2025). Occupancy Estimation in Academic Laboratory: A CO2-Based Algorithm Incorporating Temporal Features for 1–16 Occupants. Electronics, 14(7), 1377.

[12] Tsanousa, A., Moschou, C., Bektsis, E., Vrochidis, S., & Kompatsiaris, I. (2023). Fusion of environmental sensors for occupancy detection in a real construction site. Sensors, 23(23), 9596

[13] Sayed, A. N., Bensaali, F., Himeur, Y., & Houchati, M. (2023). Edge-based *real-time* occupancy detection system through a non-intrusive sensing system. Energies, 16(5), 2388

[14] Song, C., Droitcour, A. D., Islam, S. M., Whitworth, A., Lubecke, V. M., & Boric-Lubecke, O. (2023). Unobtrusive occupancy and vital signs sensing for human building interactive systems. Scientific Reports, 13(1), 954.

[15] Huang, Q., Syndicus, M., Frisch, J., & van Treeck, C. (2024). Spatial features of CO2 for occupancy detection in a naturally ventilated school building. Indoor Environments, 1(3), 100018.