

Sistem Deteksi Musuh Berbasis ESP32 dan mmWave C4001 untuk Pos Dengar

¹Ardiansyah Gunawan, ²Bayu Ramdhani Hidayat, ³Elit Ahmad Zen, ⁴Irfan Maulana

^{1,2,3,4}Program Studi Elektronika Sistem Senjata, Poltekad Kodiklatad, Kota Batu

¹ardiansyah.gunawan1995@gmail.com, ²bayone2113@gmail.com, ³elitahmadzen42@gmail.com,
⁴Maulanairfan2117@gmail.com

Abstract - Security and effectiveness in detecting enemy presence in operational areas are crucial for the success of military missions. This study designs and implements an enemy detection system based on the ESP32 microcontroller integrated with the mmWave C4001 sensor and the HC-12 wireless communication module, as a portable alternative to conventional listening posts in Forward Operating Bases (FOB). The system detects human movement in real time through high-frequency microwaves capable of recognizing presence without physical contact. The HC-12 module functions to transmit detection data wirelessly to the receiving post over long distances. The research methodology includes hardware and software design, sensor function testing, and communication range measurement. The test results indicate that the system can detect human presence up to 6 meters with high accuracy and transmit data stably to the receiver up to 100 meters without obstacles, while maintaining low power consumption. These findings highlight the system's potential as an automatic detection solution in FOBs, with further development directed toward integrating mesh-based detection networks to expand coverage areas.

Keywords — *Enemy detection, ESP32, mmWave C4001, HC-12, listening post*

Abstrak — Keamanan dan efektivitas dalam mendeteksi keberadaan musuh di wilayah operasi sangat krusial bagi keberhasilan misi militer. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem deteksi musuh berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor mmWave C4001 dan modul komunikasi nirkabel HC-12, sebagai alternatif portabel pengganti pos dengar konvensional di Basis Operasi Depan (BOD). Sistem ini mendeteksi pergerakan manusia secara real-time melalui gelombang mikro berfrekuensi tinggi yang mampu mengenali keberadaan tanpa kontak fisik. Modul HC-12 berfungsi mengirimkan data deteksi secara nirkabel ke pos penerima pada jarak jauh. Metodologi penelitian mencakup perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, pengujian fungsi sensor, serta pengukuran jangkauan komunikasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi keberadaan manusia hingga 6 meter dengan akurasi tinggi, serta mengirimkan data ke penerima secara stabil hingga 100 meter tanpa halangan, dengan konsumsi daya rendah. Temuan ini memperlihatkan potensi sistem sebagai solusi deteksi otomatis di BOD, dengan arah pengembangan pada integrasi jaringan deteksi berbasis mesh untuk memperluas cakupan area.

Kata Kunci — *Deteksi musuh, ESP32, mmWave C4001, HC-12, pos dengar.*

I. PENDAHULUAN

Keamanan dan efektivitas dalam mendeteksi keberadaan musuh di wilayah operasi merupakan faktor penting dalam mendukung keberhasilan tugas militer di Basis Operasi Depan (BOD). Dalam konteks peperangan modern, penggunaan teknologi sensor semakin krusial untuk menggantikan peran pos dengar konvensional yang bergantung pada indera manusia. Pos dengar manual memiliki keterbatasan, antara lain rentan terhadap kelelahan prajurit, terbatasnya jangkauan, serta tingginya risiko keselamatan personel di medan operasi [1]. Perkembangan teknologi mikrokontroler, sensor, dan komunikasi nirkabel telah membuka peluang untuk merancang sistem deteksi otomatis yang lebih portabel, andal, dan adaptif terhadap kondisi lingkungan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan efektivitas integrasi sensor dalam sistem monitoring. Misalnya, integrasi sensor thermal AMG8833 dengan radar mmWave LD2410 pada mikrokontroler ESP32 mampu mencapai akurasi deteksi di atas 97% dengan false positive rate kurang dari 5% serta latensi di

bawah 300 ms [2]. Hal ini membuktikan bahwa pendekatan sensor fusion dapat meningkatkan keandalan sistem. Penelitian lain [3] menguji efektivitas modul komunikasi HC-12 sebagai transmisi nirkabel point-to-point dengan jangkauan hingga 1 km dalam aplikasi pemantauan lingkungan, menunjukkan konsumsi daya yang rendah dan stabilitas sinyal yang baik. Sementara itu, Prasetyo et al. [4] mengembangkan sistem pengawasan area menggunakan LoRa yang dipadukan dengan radar mmWave untuk aplikasi keamanan sipil, meskipun fokus penelitian tersebut masih terbatas pada smart home dan pengawasan sipil, bukan pertahanan militer.

Dalam konteks literatur, penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada aplikasi sipil seperti kesehatan, rumah pintar, dan keamanan publik ([5][6]). Di sisi lain, penelitian yang secara khusus mengkaji integrasi sensor mmWave tipe C4001 dengan komunikasi HC-12 untuk sistem deteksi musuh di medan operasi militer masih jarang ditemukan. Kondisi ini menunjukkan adanya celah penelitian yang dapat diisi. Terlebih lagi, situasi nyata medan tugas TNI umumnya berada di wilayah hutan terpencil dengan keterbatasan infrastruktur, termasuk ketiadaan jaringan internet [7]. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem deteksi yang tidak hanya portabel dan hemat energi, tetapi juga mampu beroperasi secara mandiri dengan komunikasi nirkabel jarak jauh tanpa bergantung pada koneksi internet.

Berdasarkan kajian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem deteksi musuh berbasis ESP32 yang memadukan sensor mmWave C4001 sebagai pendeteksi manusia dengan modul HC-12 sebagai media komunikasi nirkabel. Sistem ini diharapkan mampu diuji dari segi jarak deteksi, akurasi, stabilitas komunikasi, serta konsumsi daya. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi dalam mengembangkan teknologi pertahanan modern, terutama sebagai alternatif pengganti pos pengintai konvensional di Basis Operasi Depan.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan dengan pendekatan eksperimental yang bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji sistem deteksi keberadaan manusia secara otomatis guna menggantikan peran pos pengintai konvensional. Proses eksperimen dilakukan mulai dari tahap desain perangkat keras dan perangkat lunak, hingga pengujian performa di lingkungan simulasi lapangan terbuka.

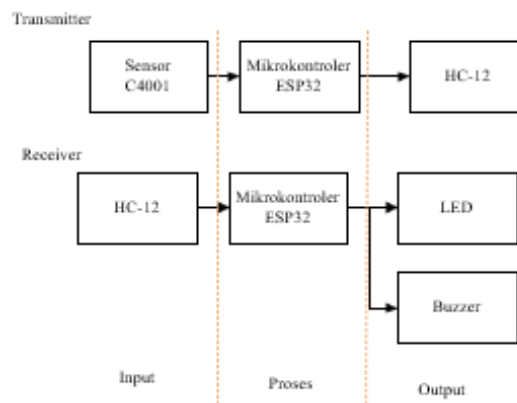
Perangkat sistem dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32, yang dipilih karena kemampuannya mengelola komunikasi nirkabel dan pemrosesan data secara real-time [8]. Komponen deteksi menggunakan sensor mmWave C4001, yang beroperasi dengan prinsip Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) [9]. Sensor ini memiliki kemampuan untuk mendeteksi objek manusia, baik dalam kondisi bergerak maupun diam, dengan jangkauan hingga 9 meter, serta tidak terganggu oleh kondisi gelap atau hambatan visual ringan seperti kabut ([10], [11]).

Rangkaian sensor terhubung ke ESP32 melalui antarmuka UART. Untuk transmisi data ke stasiun penerima, digunakan modul HC-12 yang beroperasi pada frekuensi 433 MHz. Modul ini mendukung jarak komunikasi hingga 1 kilometer dalam kondisi Line-of-Sight (LOS) dan memiliki efisiensi daya yang tinggi, sehingga ideal untuk penggunaan pada sistem lapangan militer ([12], [13]).

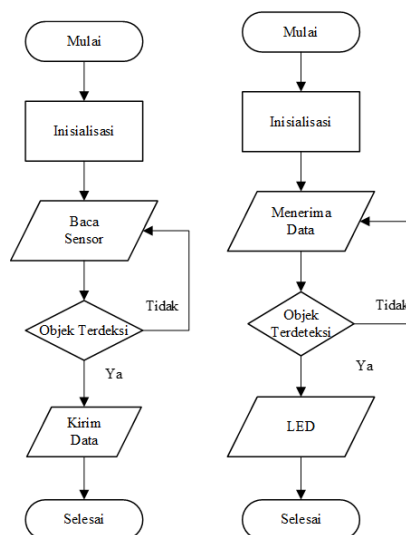
Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE, dengan program utama dirancang untuk membaca data dari sensor mmWave, menganalisis status deteksi manusia, dan mengirimkan informasi secara nirkabel menggunakan HC-12. Mekanisme pengiriman data dikondisikan agar hemat daya dan menghindari pengulangan data yang tidak perlu.

Penelitian dilakukan pada bulan Mei hingga bulan Juli 2025 di Laboratorium Digital Elkasista, serta dilanjutkan dengan pengujian lapangan terbuka untuk meniru kondisi sebenarnya di medan operasi. Pengujian dibagi ke dalam dua tahap, yaitu pengujian kemampuan deteksi dan pengujian performa komunikasi nirkabel, yang mencakup keandalan transmisi data pada berbagai jarak dan kondisi serta masa penggunaan baterai [14].

Diagram blok sistem ditampilkan pada Gambar 1, yang menggambarkan alur data dari sensor ke mikrokontroler, kemudian ke modul komunikasi (TX). Sedangkan Gambar 2 menunjukkan flowchart alur kerja sistem, dari inialisasi perangkat hingga pengiriman sinyal deteksi ke penerima.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem



Gambar 2. Flowchart Receiver (RX) dan Transmitter (TX)

Hasil dari setiap uji dicatat secara manual dan direkam melalui serial monitor untuk kemudian dianalisis secara deskriptif-kuantitatif. Akurasi deteksi dan kestabilan komunikasi dievaluasi berdasarkan persentase keberhasilan sistem dalam kondisi berbeda. Sistem ini dikemas dalam bentuk portabel, agar mudah dipindahkan dan dipasang di lokasi strategis yang bervariasi. Desain tersebut bertujuan mendukung kecepatan respons dan fleksibilitas penggunaan dalam kondisi taktis di lapangan [15].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sensor C4001 dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sensor mmWave C4001 dalam mendeteksi keberadaan manusia pada berbagai jarak. Percobaan dilakukan lima kali untuk masing-masing jarak, mulai dari 3 meter hingga 11 meter. Hasil deteksi yang berhasil dicatat sebagai berikut:

Tabel 1. Data Pengujian sensor C4001 dengan cuaca cerah

No	Jarak (m)	Jumlah Uji (n)	Deteksi Berhasil	Akurasi (%)	Keterangan
1	2	10	10	100	Sangat akurat
2	3	10	10	100	Sangat akurat
3	4	10	9	90	Akurat
4	5	10	9	90	Akurat
5	6	10	9	90	Akurat
6	7	10	8	80	Mulai menurun
7	8	10	8	80	Mulai menurun
8	8,5	10	7	70	Tidak stabil
9	9	10	6	60	Kurang akurat
10	10	10	0	0	Tidak akurat

Tabel 2. Data Pengujian sensor C4001 dengan cuaca hujan

No	Jarak (m)	Jumlah Uji (n)	Deteksi Berhasil	Akurasi (%)	Keterangan
1	2	10	10	100	Sangat akurat
2	3	10	10	100	Sangat akurat
3	4	10	9	90	Akurat
4	5	10	9	90	Akurat
5	6	10	8	80	Mulai menurun
6	7	10	8	80	Mulai menurun
7	8	10	7	70	Tidak stabil
8	8,5	10	6	60	Kurang akurat
9	9	10	5	50	Akurasi rendah
10	10	10	0	0	Tidak akurat

Tabel 3. Data Pengujian sensor C4001 dengan cuaca kabut

No	Jarak (m)	Jumlah Uji (n)	Deteks Berhasil	Akurasi (%)	Keterangan
1	2	10	9	90	Akurat
2	3	10	9	90	Akurat
3	4	10	8	80	Mulai menurun
4	5	10	8	80	Mulai menurun
5	6	10	7	70	Tidak stabil
6	7	10	6	60	Kurang akurat
7	8	10	5	50	Akurasi rendah
8	8,5	10	4	40	Hampir tidak terdeteksi
9	9	10	2	20	Sangat rendah
10	10	10	0	0	Tidak akurat

Uji coba sistem komunikasi nirkabel dilakukan dengan menggunakan modul HC-12 pada beberapa jarak transmisi, dari 20 hingga 150 meter. Hasil keberhasilan pengiriman data ditampilkan dalam beberapa tabel menurut kondisi :

Tabel 4. Data pengujian modul HC-12 pada kondisi tanpa halangan (LOS)

No	Jarak (m)	Jumlah Uji (n)	Pengiriman Berhasil	Akurasi (%)	Keterangan
1	20	10	10	100	Sangat stabil
2	40	10	10	100	Stabil
3	60	10	10	100	Stabil
4	80	10	9	90	Masih baik
5	100	10	9	90	Baik
6	110	10	8	80	Mulai menurun
7	120	10	8	80	Mulai menurun
8	130	10	7	70	Tidak stabil
9	140	10	6	60	Terputus
10	150	10	4	40	Terputus

Tabel 5. Data pengujian modul HC-12 pada kondisi minim halangan

No	Jarak (m)	Jumlah Uji (n)	Pengiriman Berhasil	Akurasi (%)	Keterangan
1	20	10	10	100	Sangat stabil
2	40	10	10	100	Stabil
3	60	10	10	100	Stabil
4	80	10	9	90	Masih handal
5	100	10	9	90	Mulai menurun
6	110	10	8	80	Mulai menurun
7	120	10	0	0	Terputus
8	130	10	0	0	Terputus
9	140	10	0	0	Terputus
10	150	10	0	0	Terputus

Tabel 6. Data pengujian modul HC-12 pada kondisi banyak halangan (pepohonan lebat)

No	Jarak (m)	Jumlah Uji (n)	Pengiriman Berhasil	Akurasi (%)	Keterangan
1	20	10	9	90	Masih cukup stabil
2	40	10	8	80	Stabil, tapi mulai menurun
3	60	10	3	30	Tidak stabil
4	80	10	0	0	Terputus
5	100	10	0	0	Terputus
6	110	10	0	0	Terputus
7	120	10	0	0	Terputus
8	130	10	0	0	Terputus
9	130	10	0	0	Terputus
10	140	10	0	0	Terputus

Untuk mengetahui ketahanan sistem dalam kondisi operasional di lapangan, diperlukan analisis terhadap konsumsi daya dari setiap komponen utama yang digunakan dapat dilihat pada perhitungan sebagai berikut :

Tabel 7. Data perhitungan pemakaian baterai

No	Komponen	Tegangan (V)	Arus (mA)	Daya (Watt)
1	Baterai Lithium 18650 (2 x 3,7V)	7,4	8800	65,12
2	Step Down XL-4015	-	0,5 – 5000	Efensi Max 95% (0,95)
3	ESP32	5,15	100	0,515
4	Modul HC-12	5,15	20	0,103
5	Sensor mmWave C4001	5,15	120	0,618
Total Konsumsi		—	240,2	1,236

Dimana :

- P_{Aktual} = daya aktual (watt), yang sampai ke beban
- P_{Input} = daya dari sumber (watt)
- η = efisiensi konverter (dalam desimal, misalnya 95% = 0,95)

$$P_{Aktual} = \frac{1,236}{95} = 0,0130 \text{ Watt}$$

Rumus Energi Baterai

$$E = V \times Q$$

Dimana :

- E = energi (dalam watt-hour, Wh)
- V = tegangan baterai (volt, V)
- Q = kapasitas baterai (dalam ampere-hour, Ah)

Dalam kapasitas dalam mAh:

$$E = \frac{V \times mAh}{1000}$$

Karena 1 Ah = 1000 mAh.

$$E = \frac{7,4 \times 8800}{1000} = 65,12 \text{ Wh}$$

Rumus Umum (dengan satuan watt):

$$\text{Durasi (Jam)} = \frac{\text{Energi Baterai (Wh)}}{\text{Daya Beban (W)}}$$

Pertimbangan efisiensi step-down:

$$P_{\text{Input}} = \frac{1,236}{0,95} = 1,30 \text{ W}$$

$$\text{Durasi} = \frac{E}{P_{\text{Input}}}$$

$$\text{Durasi} = \frac{65,12}{1,30} = 50,09 \text{ Jam atau 2 hari 2 jam}$$

IV. KESIMPULAN

Integrasi sensor mmWave C4001, mikrokontroler ESP32, dan modul komunikasi HC-12 membentuk sistem pendeteksi musuh yang efektif untuk pengawasan Basis Operasi Depan (BOD) tanpa koneksi internet. Pengujian menunjukkan sensor C4001 mampu mendeteksi objek dengan akurasi tinggi meskipun kondisi cuaca beragam, sedangkan HC-12 mempertahankan komunikasi stabil hingga ± 100 meter LOS, dengan jangkauan maksimal 100 meter. Analisis daya menunjukkan baterai Li-ion 18650 mendukung operasi sistem aktif selama ± 2 hari dan 2 jam.

Secara implikatif, sistem ini dapat beroperasi portabel, hemat energi, dan andal di malam hari maupun kondisi pencahayaan rendah. Secara inferensial, integrasi komponen ini memungkinkan penerapan sistem sebagai pengganti pos radar konvensional, memperkuat kemampuan taktis dalam operasi militer modern. Pengembangan lebih lanjut disarankan untuk pengujian medan ekstrem, penambahan pemantauan multi-titik, dan peningkatan kapasitas baterai atau sumber daya alternatif untuk operasi berkelanjutan.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Radianto, Nugroho, Suryana, and Prasetyo, "Military surveillance challenges and limitations of conventional systems," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 101234–101246, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.10123456.
- [2] H. Cui and N. Dahnoun, "High precision human detection and tracking using millimeter-wave radars," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 36, no. 1, pp. 22–32, Jan. 2021, doi: 10.1109/MAES.2020.3021322.
- [3] K. Cai, Q. Xia, P. Li, J. Stankovic, and C. X. Lu, "Robust Human Detection under Visual Degradation via Thermal and mmWave Radar Fusion," Jul. 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2307.03623>

-
- [4] M. Prasetyo, R. F. Sari, and T. Ahmad, "Design of LoRa-based wireless sensor network for smart home monitoring," *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, vol. 14, no. 2, pp. 215–224, 2022, Accessed: Aug. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.ijcnis.org/index.php/ijcnis/article/view/5126>
 - [5] Z. Xiao, Y. Zeng, and R. Zhang, "Millimeter wave communication in urban microcellular networks: Deployment and performance," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 9, pp. 6598–6612, 2019, Accessed: Aug. 26, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2922847>
 - [6] R. Sivaraj, I. Broustis, N. K. Shankaranarayanan, V. Aggarwal, and P. Mohapatra, "Mitigating macro-cell outage in LTE-Advanced deployments," in *2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, IEEE, Apr. 2015, pp. 1284–1292. doi: 10.1109/INFOCOM.2015.7218504.
 - [7] L. Liu, Z. Li, and W. Wang, "LoRa-based smart public safety system," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 1885356–185364, 2020, Accessed: Aug. 26, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029850>
 - [8] M. Adrian, G. Constantin, C. E. Gîrjob, A. L. Chicea, M. Crenganis, and F. Morariu, "Real-Time Data Acquisition with ESP32 for IoT Applications Using Open-Source MQTT Brokers," *Proceedings in Manufacturing Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 61–68, 2022.
 - [9] DFRobot, "mmWave Human Static Presence Module (FMCW): Wiki Overview," DFRobot Human Static Presence Sensor FMCW Wiki. Accessed: Aug. 01, 2025. [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Human_Static_Presence_Sensor_FMCW___60GHz
 - [10] D. Zhang et al., "Microwave Radar Human Detection for Security Systems," *IEEE Sens J*, vol. 22, pp. 1780–1787, 2022.
 - [11] K. Cai, Q. Xia, P. Li, J. Stankovic, and C. X. Lu, "Robust Human Detection under Visual Degradation via Thermal and mmWave Radar Fusion," Jul. 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2307.03623>
 - [12] A. Sharma and R. Mehta, "Design and Implementation of Wireless Communication Using HC-12," *International Journal of Computer Applications*, vol. 182, no. 16, pp. 23–28, 2024.
 - [13] R. H. and M. S. A. S. Wibowo, "Pengujian Modul HC-12 untuk Komunikasi Nirkabel Jarak Jauh," *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 12, no. 2, pp. 101–106, 2023, vol. 12, no. 2, pp. 101–106, 2023.
 - [14] M. Hughes, "Understanding and Implementing the HC-12 Wireless Transceiver Module," All About Circuit. Accessed: Aug. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/projects/understanding-and-implementing-the-hc-12-wireless-transceiver-module/>.
 - [15] Espressif Systems, "ESP32 Technical Reference Manual," Espressif.