



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (AE43250)

**IMPLEMENTASI *INDOOR POSITIONING SYSTEM* (IPS)
MENGUNAKAN TEKNOLOGI *ULTRA-WIDEBAND* (UWB)
UNTUK PEMANTAUAN PEKERJA DENGAN METODE
TRILATERASI**

Rina Adella Pratiwi
NRP. 0922040071

Dosen Pembimbing
Noorman Rinanto, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Yuning Widiarti, S.T., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK OTOMASI
JURUSAN TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (AE43250)

**IMPLEMENTASI *INDOOR POSITIONING SYSTEM* (IPS)
MENGUNAKAN TEKNOLOGI *ULTRA-WIDEBAND* (UWB)
UNTUK PEMANTAUAN PEKERJA DENGAN METODE
TRILATERASI**

Rina Adella Pratiwi
NRP. 0922040071

Dosen Pembimbing
Noorman Rinanto, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Yuning Widiarti, S.T., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK OTOMASI
JURUSAN TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

IMPLEMENTASI *INDOOR POSITIONING SYSTEM* (IPS) MENGUNAKAN TEKNOLOGI *ULTRA-WIDEBAND* (UWB) UNTUK PEMANTAUAN PEKERJA DENGAN METODE TRILATERASI

Disusun Oleh:
Rina Adella Pratiwi
0922040071

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 Teknik Otomasi
Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 23 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji

1. Noorman Rinanto, S.T., M.T., Ph.D.
2. Isa Rachman, S.T., M.T.
3. Mustika Kurnia Mayangsari, S.Kom., M.Tr.Kom.
4. Afif Zuhri Arfianto, S.T., M.T.

NIDN/NUPTK

(0014107607)
(0016088003)
(0835774675230272)
(0003128701)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)
(.....)
(.....)

Dosen Pembimbing

1. Noorman Rinanto, S.T., M.T., Ph.D.
2. Dr. Yuning Widiarti, S.T., M.T.

NIDN/NUPTK

(0014107607)
(0016058004)

Tanda Tangan

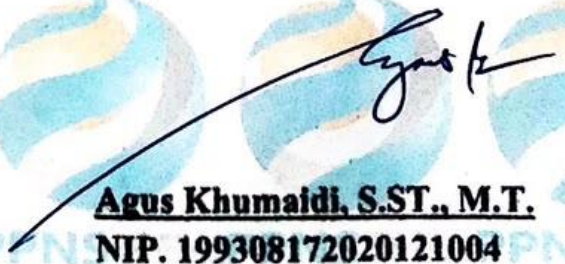
(.....)
(.....)

Menyetujui
Ketua Jurusan,



Isa Rachman, S.T., M.T.
NIP. 198008162008121001

Mengetahui
Koordinator Program Studi,


Agus Khumaldi, S.ST., M.T.
NIP. 199308172020121004

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

	<u>PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT</u>	No. : F.WD I. 021 Date : 3 Nopember 2015 Rev. : 01 Page : 1 dari 1
---	--	---

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Rina Adella Pratiwi

NRP. : 0922040071

Jurusan/Prodi : Teknik Kelistrikan Kapal/Teknik Otomasi

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

IMPLEMENTASI *INDOOR POSITIONING SYSTEM* (IPS) MENGGUNAKAN TEKNOLOGI *ULTRA-WIDEBAND* UNTUK PEMANTAUAN PEKERJA DENGAN METODE TRILATERASI

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 25 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,



(Rina Adella Pratiwi)
NRP. 0922040071

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan jenjang Diploma 4 Program Studi Teknik Otomasi di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini tidak lepas dari peran berbagai pihak yang telah banyak memberikan bimbingan, arahan, bantuan, dukungan, serta semangat. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Soeprapto dan Ibu Ma'rifah yang tiada hentinya melangitkan doa baiknya serta memberikan kasih sayang dan dukungan untuk kelancaran putrinya dalam menuntaskan pendidikan. Terimakasih selalu berjuang untuk kehidupan penulis, semoga ini menjadi langkah awal untuk membuat bapak dan ibu bahagia.
2. Adik perempuan Aqila Syaurah Pratiwi yang senantiasa memberikan doa, keceriaan, dan semangat untuk penulis. Terimakasih telah menjadi salah satu alasan terbesar bagi penulis untuk terus berjuang menjadi pribadi yang lebih baik. Kehadiranmu selalu menjadi pengingat bagi penulis bahwa setiap langkah dan pencapaian hari ini bukan hanya untuk diri sendiri, tetapi juga agar dapat menjadi teladan baik.
3. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Isa Rachman, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Bapak Agus Khumaidi, S.ST., M.T. selaku Koordinator Program Studi Teknik Otomasi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
6. Bapak Noorman Rinanto, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I yang telah mengarahkan, memberi koreksi, solusi dan memberi dukungan sangat penuh dalam penyusunan Tugas Akhir ini dengan baik.
7. Ibu Dr. Yuning Widiarti, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah

sabar membimbing, memberikan solusi, serta membagikan banyak ilmu sehingga Tugas Akhir ini dapat penulis selesaikan dengan baik.

8. Bapak Dhadhang SBW, S.ST. selaku Direktur CV ROV Indonesia dan Founder Sekolah Robot Indonesia yang telah membantu menyediakan dan meminjamkan perangkat yang digunakan dalam Tugas Akhir ini.
9. Keluarga besar penulis yang selalu memberikan doa, kasih sayang dan dukungan. Setiap perhatian, nasihat dan semangat yang diberikan menjadi pengingat bahwa penulis tidak pernah berjalan sendiri dalam proses ini.
10. Prizco Zulvano Shaputra yang selalu hadir sebagai pendengar setia dan menerima setiap sisi diri penulis tanpa menghakimi. Setiap tawa, diskusi dan dukungan yang diberikan menjadi penyemangat dalam menghadapi setiap tantangan akademis dan personal. Terimakasih telah menjadi bagian dalam proses perjalanan hidup penulis.
11. Untuk keluarga besar Teknik Otomasi khususnya TO'C Angkatan 2022 dan C(iwi). Terimakasih atas kebersamaan yang telah mewarnai masa perkuliahan penulis, senang bisa bertemu dan membuat cerita baru dengan orang-orang hebat seperti kalian.
12. Seluruh keluarga besar Tim Robot ARTSHIP yang telah memberikan banyak ilmu, dan pengalaman yang sangat berarti bagi penulis selama proses perjalanan akademik.

Terimakasih banyak penulis ucapkan kepada semua pihak yang telah membantu, semoga kebajikannya dibalas oleh Allah SWT, Amiin. Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan dan jauh dari sempurna. Penulis juga berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan bagi semua pihak yang membaca Tugas Akhir ini.

Surabaya, 07 September 2026

Penulis,

Rina Adella Pratiwi

Implementasi *Indoor Positioning System* (IPS) Menggunakan Teknologi *Ultra-Wideband* (UWB) Untuk Pemantauan Pekerja Dengan Metode Trilaterasi

Rina Adella Pratiwi

ABSTRAK

Dalam perkembangan teknologi saat ini, keamanan dan pemantauan di lingkungan *indoor* menjadi aspek penting untuk mendukung efisiensi dan keselamatan kerja. Salah satu tantangan di lingkungan kerja adalah sistem pemantauan posisi dan autentikasi akses pekerja pada area tertutup. Sistem konvensional masih memiliki keterbatasan dalam menentukan posisi secara akurat serta rentan terhadap penyalahgunaan akses. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan *Indoor Positioning System* (IPS) berbasis *Ultra-Wide-Band* (UWB) yang terintegrasi dengan sistem autentikasi *fingerprint* untuk pemantauan pekerja secara *real-time*. Metode trilaterasi digunakan untuk menghitung koordinat posisi berdasarkan data jarak antara satu tag dan tiga anchor UWB. Hasil koordinat ditampilkan pada *website monitoring* secara *real-time* beserta informasi posisi pekerja, status zona, dan riwayat data. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penempatan anchor pada Skenario 2 memberikan performa terbaik dengan rata-rata persentase error sebesar 3,62% pada sumbu X dan 2,47% pada sumbu Y. Pengujian kondisi *Line of Sight* (LoS) dan *Non-Line of Sight* (NLoS) menunjukkan bahwa keberadaan penghalang dan efek *multipath* memengaruhi akurasi estimasi posisi. Meskipun demikian, sistem berhasil melakukan pelacakan posisi secara *real-time* dan mengintegrasikan autentikasi *fingerprint*, metode trilaterasi, serta *website monitoring* untuk mendukung pemantauan pekerja di lingkungan *indoor*.

Kata kunci: Autentikasi, *Indoor Positioning System* (IPS), Trilaterasi, *Ultra-Wideband* (UWB)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Implementation of Indoor Positioning System (IPS) Using Ultra-Wideband Technology for Worker Monitoring Using the Trilateration Method

Rina Adella Pratiwi

ABSTRACT

In this current situation, security and monitoring within indoor environments have become crucial for supporting operational efficiency and workplace safety. A key challenge in such environments is the implementation of systems for tracking worker locations and authenticating access within enclosed areas. Conventional systems often struggle to determine precise locations and remain vulnerable to unauthorized access. This research aims to design and implement an Ultra-Wideband (UWB)-based Indoor Positioning System (IPS) integrated with fingerprint authentication for real-time worker monitoring. A trilateration method is employed to calculate positional coordinates based on distance data between a single tag and three UWB anchors. The resulting coordinates, along with worker location details, zone status, and data history, are displayed in real-time on a monitoring website. Test results indicate that the anchor placement in Scenario 2 yielded the best performance, with an average error rate of 3.62% on the X-axis and 2.47% on the Y-axis. Evaluations under Line-of-Sight (LoS) and Non-Line-of-Sight (NLoS) conditions revealed that obstacles and multipath effects impact the accuracy of position estimation. Nevertheless, the system successfully achieved real-time position tracking and integrated fingerprint authentication, trilateration, and a monitoring website to facilitate worker monitoring in indoor environments.

Keywords: Authentication, Indoor Positioning System (IPS), Trilateration, Ultra-Wideband (UWB)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR NOTASI.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Penelitian.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kajian Penelitian Terdahulu	5
2.2 Metode	7
2.2.1 Indoor Positioning Sytem (IPS)	7
2.2.2 Autentikasi	9
2.2.3 Trilaterasi	10
2.2.4 Two-Way Ranging	11
2.3 <i>Software</i>	12

2.3.1	Arduino IDE (Integrated Development Environment)	13
2.3.2	Visual Studio Code	13
2.3.3	phpMyAdmin.....	14
2.4	<i>Hardware</i>	15
2.4.1	DWM1000	15
2.4.2	Fingerprint Sensor	17
2.4.3	ESP32	19
2.4.4	Relay.....	20
2.4.5	Solenoid Door lock.....	20
2.4.6	Limit Switch	21
2.4.7	OLED Display	22
2.4.8	Baterai Lithium Polymer (Li-Po).....	22
2.4.9	Baterai Lithium-Ion (Li-Ion)	23
2.4.10	Push Button.....	24
BAB 3 METODE PENELITIAN.....		25
3.1	Konsep Penelitian.....	25
3.2	Gambaran Umum Sistem	26
3.3	Alur Kerja Sistem.....	28
3.3.1	Algoritma Asymmetric Double-Sided Two-Way Ranging (ADS-TWR)	30
3.3.2	Penentuan Posisi Menggunakan Metode Trilaterasi	34
3.3.3	Mekanisme Penentuan Status Keamanan Area Berbasis Posisi Tag..	41
3.4	Tahapan Penelitian	42
3.4.1	Identifikasi Masalah.....	43
3.4.2	Studi Literatur.....	44
3.4.3	Analisa Kebutuhan Sistem.....	45

3.5	Skenario Pengujian	46
3.5.1	Parameter Evaluasi Kinerja Sistem	48
3.6	Perencanaan dan Desain Sistem	49
3.6.1	Perancangan Sistem Hardware	50
3.6.2	Desain Alat	51
3.6.3	Perancangan Desain Elektrik	53
3.6.4	Ilustrasi Penempatan Posisi Anchor	54
3.6.5	Perancangan dan Desain Interface	55
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	57
4.1	Hasil Perakitan Rangkaian Elektrik	57
4.1.1	Rangkaian Minimum Sistem ESP32	57
4.1.2	Rangkaian PCB Integrasi	58
4.1.3	Rangkaian Sistem Autentikasi	59
4.2	Hasil Pengujian Komponen Sistem	61
4.2.1	Pengujian Pengukuran Jarak Anchor dan Tag per Meter	61
4.2.2	Pengujian Ketahanan Baterai	67
4.2.3	Pengujian OLED Display	69
4.2.4	Pengujian Fingerprint Sensor	70
4.2.5	Pengujian Solenoid Door lock	74
4.3	Pengujian Sistem Autentikasi <i>Fingerprint</i>	76
4.3.1	Pengujian Pembacaan Sidik Jari dan Integrasi Sistem	76
4.3.2	Pengujian Akses Masuk Ruangan	78
4.4	Pengujian Sistem <i>Indoor</i> Positioning (UWB)	80
4.4.1	Penempatan Tag Untuk Pekerja	80
4.4.2	Analisis Penempatan Anchor Optimal	82
4.4.3	Pengujian Sistem pada Skala Ruangan	91

4.4.4	Pengujian Kondisi Line of Sight (LoS) dan Non-Line of Sight (NLoS)	94
4.5	Hasil Perancangan <i>Website</i> Monitoring	97
4.5.1	Sistem Login Interface Website	98
4.5.2	Tampilan Halaman Utama Website	99
4.6	Analisa Implementasi Sistem <i>Indoor</i> Positioning System (IPS)	101
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		103
5.1	Kesimpulan	103
5.2	Saran	104
DAFTAR PUSTAKA		105
LAMPIRAN		109
	Lampiran 1 Biodata Mahasiswa	109

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kajian Penelitian Terdahulu.....	5
Tabel 2. 2 Perbandingan Teknologi untuk <i>Indoor Positioning System</i> (IPS)	8
Tabel 2. 3 Spesifikasi Teknis Modul DW1000	16
Tabel 2. 4 Spesifikasi ESP32	19
Tabel 3. 1 Tabel Pemetaan Area Berdasarkan Koordinat Posisi Tag	42
Tabel 3. 2 Komponen Sistem <i>Hardware</i>	45
Tabel 4. 1 Pengukuran Anchor 1 ↔ Tag Untuk Jarak Pembacaan Sensor dengan Jarak Real tiap 1 meter	61
Tabel 4. 2 MAE dan RMSE Per Meter Untuk Anchor 1 ↔ Tag	62
Tabel 4. 3 Pengukuran Anchor 2 ↔ Tag Untuk Jarak Pembacaan Sensor dengan Jarak Real tiap 1 meter	63
Tabel 4. 4 MAE dan RMSE Per Meter Untuk Anchor 2 ↔ Tag	64
Tabel 4. 5 Pengukuran Anchor 3 ↔ Tag Untuk Jarak Pembacaan Sensor dengan Jarak Real tiap 1 meter	65
Tabel 4. 6 Perhitungan MAE dan RMSE Per Meter Untuk Anchor 3 ↔ Tag.....	66
Tabel 4. 7 Hasil pengujian ketahanan baterai saat <i>node</i> melakukan transmit data	68
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Keberhasilan Menampilkan Data OLED Display	70
Tabel 4. 9 Koneksi ESP32 dengan <i>Fingerprint</i> Sensor AS608	71
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Pendaftaran Sidik Jari	72
Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Proses Verifikasi Sidik Jari.....	73
Tabel 4. 12 Pengujian Proses Verifikasi dengan 2 ID Sidik Jari	74
Tabel 4. 13 Hasil Pengujian <i>Solenoid Door lock</i>	75
Tabel 4. 14 Hasil Pengujian Pembacaan Sidik Jari dan Integrasi Sistem	78
Tabel 4. 15 Hasil Pengujian Pembacaan Sidik Jari dan Integrasi Sistem	79
Tabel 4. 16 Dokumentasi Kondisi Pengujian Sistem Autentikasi <i>Fingerprint</i>	79
Tabel 4. 17 Hasil Pengujian Skenario 1	83
Tabel 4. 18 <i>Error</i> Koordinat Real dengan Koordinat Alat	84
Tabel 4. 19 Hasil Pengujian Skenario 2	86
Tabel 4. 20 <i>Error</i> Koordinat Real dengan Koordinat Alat	87
Tabel 4. 21 Hasil Pengujian Skenario 3	89

Tabel 4. 22 <i>Error</i> Koordinat Real dengan Koordinat Alat.....	89
Tabel 4. 23 Perbandingan Hasil Pengujian Tiga Skenario Penempatan Anchor...	90
Tabel 4. 24 Hasil Pengujian Sistem pada Skala Ruangan	92
Tabel 4. 25 <i>Error</i> Koordinat Real dengan Koordinat Alat.....	93
Tabel 4. 26 Hasil Posisi Tag Kondisi NLoS.....	95
Tabel 4. 27 Riwayat Data	100

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi Metode Trilaterasi	10
Gambar 2. 2 Ilustrasi <i>Asymmetric Double-Sided Two-Way Ranging</i>	12
Gambar 2. 3 Arduino.....	13
Gambar 2. 4 Logo <i>Visual Studio Code</i>	14
Gambar 2. 5 phpMyAdmin	14
Gambar 2. 6 Modul DWM1000	15
Gambar 2. 7 Rangkaian Dalam Modul DWM1000	15
Gambar 2. 8 <i>Fingerprint</i> Sensor	18
Gambar 2. 9 ESP32	19
Gambar 2. 10 Relay.....	20
Gambar 2. 11 Solenoid <i>Door lock</i>	21
Gambar 2. 12 <i>Limit Switch</i>	22
Gambar 2. 13 0,96 Inch OLED <i>Display</i>	22
Gambar 2. 14 Baterai Li-Po	23
Gambar 2. 15 Baterai Li-ion	24
Gambar 2. 16 <i>Push Button</i>	24
Gambar 3. 1 Gambaran Umum Sistem.....	26
Gambar 3. 2 Alur Kerja Sistem	28
Gambar 3. 3 Alur perhitungan posisi	35
Gambar 3. 4 Ilustrasi Metode Trilaterasi	36
Gambar 3. 5 Parameter Trilaterasi	39
Gambar 3. 6 Parameter Trilaterasi 2	41
Gambar 3. 7 Tahapan Penelitian	43
Gambar 3. 8 Skenario Pengujian	46
Gambar 3. 9 Diagram Blok Konseptual Sistem	50
Gambar 3. 10 Diagram Realisasi Perangkat Keras Sistem	51
Gambar 3. 11 Desain <i>Node</i> Tag dan <i>Node</i> Anchor	52
Gambar 3. 12 Desain Alat Autentikasi pada Pintu	52
Gambar 3. 13 Pemasangan Alat Autentikasi pada Pintu	53
Gambar 3. 14 Desain Minimum System	53

Gambar 3. 15 1 Set <i>Node</i> Anchor & <i>Node</i> Tag	54
Gambar 3. 16 Lokasi Penelitian	54
Gambar 3. 17 Tata Letak Ruang dan Posisi Koordinat Anchor	55
Gambar 3. 18 Desain Interface	56
Gambar 4. 1 Desain Skematik ESP32	58
Gambar 4. 2 Desain Board ESP32	58
Gambar 4. 3 Hasil Cetak Board ESP32.....	58
Gambar 4. 4 Desain Skematik PCB Anchor	59
Gambar 4. 5 Desain Skematik PCB Tag	59
Gambar 4. 6 Desain Skematik Sistem Autentikasi.....	60
Gambar 4. 7 Hasil Perancangan PCB.....	60
Gambar 4. 8 Pengujian Pengukuran Jarak.....	61
Gambar 4. 9 Grafik Pembacaan Jarak Anchor 1 ↔ Tag.....	63
Gambar 4. 10 Grafik Pembacaan Jarak Anchor 2 ↔ Tag.....	65
Gambar 4. 11 Grafik Pembacaan Jarak Anchor 3 ↔ Tag.....	67
Gambar 4. 12 Pengujian Ketahanan Baterai.....	68
Gambar 4. 13 Pengujian OLED Display	70
Gambar 4. 14 Pengujian <i>Fingerprint</i> Sensor.....	71
Gambar 4. 15 Tampilan Serial Monitor Pengujian Verifikasi Sidik Jari	73
Gambar 4. 16 Modul Relay	75
Gambar 4. 17 Proses Autentikasi	77
Gambar 4. 18 Tag Terdeteksi	77
Gambar 4. 19 Penempatan Tag Untuk Pekerja.....	81
Gambar 4. 20 Ilustrasi Titik Pengujian.....	82
Gambar 4. 21 Ilustrasi Penempatan Anchor Skenario 1	83
Gambar 4. 22 Ilustrasi Penempatan Anchor Skenario 2.....	86
Gambar 4. 23 Ilustrasi Penempatan Anchor Skenario 3.....	88
Gambar 4. 24 Tampilan Kondisi NLoS (Pintu Terbuka)	96
Gambar 4. 25 Tampilan Kondisi NLoS (Pintu Tertutup).....	96
Gambar 4. 26 Tampilan Halaman Login	98
Gambar 4. 27 Dashboard Monitoring Sistem.....	100
Gambar 4. 28 Tampilan Riwayat Pengiriman Data.....	101

DAFTAR NOTASI

T_{round1}	: Waktu tempuh bolak-balik sinyal pertama (<i>round-trip time 1</i>)
T_{round2}	: Waktu tempuh bolak-balik sinyal kedua (<i>round-trip time 2</i>)
T_{reply1}	: Waktu balasan node penerima pada pengukuran pertama
T_{reply2}	: Waktu balasan node penerima pada pengukuran kedua
T_{prop}	: Waktu propagasi sinyal satu arah
x,y	: Koordinat posisi tag UWB yang dicari (2D)
d	: Jarak (meter)
c	: Kecepatan cahaya di udara ($\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).
n	: Jumlah data pengujian
x_i	: Jarak sebenarnya
$\hat{x}_i$	: Hasil sensor
a	: koordinat sumbu x
b	: koordinat sumbu y
r	: Jarak anchor ke tag
ΔX	: Selisih koordinat sumbu X real dengan koordinat sumbu X alat
ΔY	: Selisih koordinat sumbu Y real dengan koordinat sumbu Y alat

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pesatnya perkembangan teknologi informasi dan sistem otomasi industri mendorong meningkatnya kebutuhan akan sistem pemantauan posisi objek secara presisi, khususnya pada lingkungan dalam ruangan. Pada saat ini, penentuan posisi masih sering bergantung pada teknologi *Global Navigation Satellite System* (GNSS) seperti *Global Positioning System* (GPS) yang memiliki tingkat akurasi cukup baik pada lingkungan luar ruangan. Akan tetapi, GNSS menunjukkan performa yang sangat terbatas ketika diterapkan pada lingkungan *indoor*, hal itu akibat adanya redaman sinyal oleh dinding dan struktur bangunan, efek *multipath* akibat pantulan sinyal, serta kondisi *non-line-of-sight* (NLoS) antara penerima dan satelit, sehingga akurasi penentuan posisi tidak lagi dapat diandalkan (Tomažič, 2021).

Selain itu, banyak sistem pemantauan saat ini masih menggunakan CCTV konvensional yang hanya menampilkan gambar visual dan memiliki *blind spot*. Kondisi ini membatasi kemampuan pengawasan secara menyeluruh, sehingga informasi posisi objek atau pengguna tidak dapat dipantau secara *real-time* dan presisi. Situasi ini menimbulkan kebutuhan akan solusi alternatif yang mampu memberikan informasi posisi secara akurat, stabil, dan andal di lingkungan *indoor*, terlepas dari kondisi fisik bangunan.

Indoor Positioning System (IPS) berkembang sebagai salah satu solusi potensial untuk menjawab permasalahan tersebut, dengan salah satu teknologi pendukung yang banyak dikembangkan adalah *Ultra-Wideband* (UWB). Teknologi UWB memiliki karakteristik *bandwidth* yang sangat lebar, tingkat interferensi yang rendah, serta ketahanan yang lebih baik terhadap efek *multipath* dibandingkan teknologi nirkabel lainnya (Bottiglierio et al., 2021). Hal ini menjadikan UWB mampu memberikan akurasi penentuan jarak hingga skala sentimeter, baik pada kondisi *Line of Sight* (LOS) maupun pada kondisi *Non-Line of Sight* (NLoS) tertentu (Al-Okby et al., 2024a). Selain itu, UWB mendukung *time-based ranging* yang memungkinkan pengukuran jarak berbasis *Time of*

Flight (ToF) atau *Two-Way Ranging* (TWR), menjadikannya salah satu teknologi yang sangat potensial untuk aplikasi pelacakan objek bergerak secara *real-time* di lingkungan *indoor* (Ziegler et al., 2023).

Dalam implementasinya, sistem IPS berbasis UWB umumnya menggunakan modul Decawave DWM1000, yang memanfaatkan *timestamp* digital internal untuk menghitung waktu propagasi sinyal secara presisi, menghasilkan informasi jarak antar perangkat yang akurat. Data jarak tersebut kemudian diolah menggunakan metode komputasi geometris, seperti trilaterasi untuk menentukan koordinat posisi objek berdasarkan jarak terhadap beberapa anchor yang telah diketahui posisinya. Metode trilaterasi dipilih karena andal dan relatif sederhana untuk diimplementasikan.

Sejalan dengan tuntutan akan meningkatnya kebutuhan akan inovasi serta standar keamanan yang lebih tinggi, pengembangan sistem *Indoor Positioning System* (IPS) menjadi semakin relevan dan diperlukan. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini berfokus dalam pengimplementasian sistem IPS berbasis UWB dengan metode trilaterasi yang dilengkapi fitur autentikasi biometrik menggunakan sensor sidik jari (*fingerprint*). Keunggulan dari sistem yang dikembangkan adalah adanya integrasi autentikasi yang bertujuan menambahkan lapisan keamanan sehingga hanya pengguna terverifikasi yang dapat mengakses area tertentu. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan tidak hanya berfungsi sebagai pemantauan posisi, tetapi juga sebagai pendukung keamanan dan keselamatan kerja (*safety compliance*), khususnya dalam pengawasan pergerakan pengguna dan pengendalian akses pada area terbatas. Diharapkan, sistem IPS berbasis UWB ini mampu memberikan informasi posisi secara akurat, *real-time*, dan stabil. Integrasi fitur autentikasi juga meningkatkan tingkat keamanan secara keseluruhan, sehingga sistem ini memberikan kontribusi terhadap efisiensi operasional, pengelolaan sumber daya manusia, serta penerapan standar keamanan pada lingkungan industri maupun institusi lainnya.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana mengimplementasikan teknologi *Ultra-Wideband* (UWB)

dalam perancangan *Indoor Positioning System* (IPS)?

2. Bagaimana perancangan sistem informasi pemantauan pekerja secara *real-time*?
3. Bagaimana perancangan sistem autentikasi pekerja untuk meningkatkan keamanan akses?
4. Bagaimana performansi sistem pada penerapan *Indoor Positioning System* (IPS) menggunakan teknologi *Ultra-Wideband* (UWB)?

1.3 Batasan Penelitian

Batasan penelitian yang ada dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Sistem *tracking* secara *real-time* hanya dilakukan pada area dalam ruang yang memiliki ukuran sesuai dengan lokasi penelitian, yaitu Laboratorium Navigasi Gedung J lantai 7.
2. Penentuan koordinat posisi menggunakan metode trilaterasi untuk mengetahui posisi pekerja.
3. Penelitian ini menggunakan perangkat 1 tag UWB merepresentasikan pekerja. Tag digunakan oleh pekerja sebagai identitas sekaligus objek yang dimonitor posisinya oleh *Indoor Positioning System* (IPS).
4. Penelitian ini dilakukan dalam satu ruangan sebagai area pengujian sistem dengan menggunakan 4 *node* UWB DWM1000 yang dikonfigurasi sebagai 3 anchor dan 1 tag.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari Tugas Akhir ini adalah:

1. Mampu membuat sebuah sistem pemantauan pekerja dengan menggunakan *Indoor Positioning System* (IPS) berbasis teknologi *Ultra-Wideband* (UWB).
2. Merancang sistem informasi pemantauan pekerja secara *real-time* dengan fitur keamanan yang ditampilkan pada *interface*.
3. Merancang sistem autentikasi pekerja berbasis sidik jari untuk meningkatkan keamanan sistem dengan membatasi akses hanya bagi pengguna yang terverifikasi.

4. Mengevaluasi kinerja *Indoor Positioning System* (IPS) berbasis *Ultra-Wideband* (UWB) berdasarkan akurasi penentuan posisi, pelacakan secara *real-time*, serta kemampuan sistem dalam memantau pergerakan di lingkungan *indoor*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian dari pengerjaan Tugas Akhir ini adalah :

1. Meningkatkan akurasi penentuan posisi pekerja yang berada di lingkungan dalam ruangan.
2. Dapat menjadi acuan praktis bagi institusi atau perusahaan dalam memantau posisi secara *real-time* di lingkungan *indoor*, meningkatkan keamanan dan efisiensi operasional, serta mengurangi keterbatasan yang muncul pada sistem konvensional.
3. Menyediakan lapisan keamanan tambahan melalui sistem autentikasi, sehingga hanya pekerja yang terverifikasi yang dapat mengakses area terbatas.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Terdahulu

Kajian terdahulu disusun untuk memberikan gambaran mengenai penelitian-penelitian sebelumnya yang relevan dengan topik Tugas Akhir ini, serta sebagai dasar dalam mengidentifikasi posisi penelitian yang akan dilakukan. Melalui kajian terhadap penelitian-penelitian tersebut, dapat diperoleh pemahaman mengenai pendekatan metode yang telah digunakan, hasil yang dicapai, serta keterbatasan yang masih ada. Hal ini menjadi landasan penting dalam merumuskan arah pengembangan penelitian ini, sehingga sistem yang dirancang tidak hanya mengadopsi metode yang telah terbukti, tetapi juga mampu memberikan kontribusi baru sesuai dengan kebutuhan.

Tabel 2. 1 Kajian Penelitian Terdahulu

No.	Penulis & Tahun	Judul Jurnal	Fokus Utama Penelitian	Perbedaan / Kontribusi Pada Penelitian Ini
1.	Bottigliero et al., 2021	<i>A Low-Cost Indoor Real-time Locating System Based on TDOA Estimation of UWB Pulse Sequences</i>	Pengembangan sistem lokalisasi <i>real-time</i> berbasis UWB untuk menentukan posisi tag dalam lingkungan <i>indoor</i> dengan biaya rendah dan akurasi tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem UWB yang dikembangkan memiliki performa yang baik dalam lingkungan <i>indoor</i> , termasuk ketahanan terhadap efek <i>multipath</i> serta kemampuan menghasilkan estimasi posisi yang cukup presisi, sehingga berpotensi diterapkan untuk aplikasi pelacakan secara <i>real-time</i> .	Penelitian ini tidak hanya berfokus pada akurasi sistem secara teknis, akan tetapi juga pengaplikasian secara nyata untuk pemantauan pekerja dalam dunia industri.
2	Muhamad Ilham Pratama, 2024	Rancang Bangun <i>Indoor Positioning System (IPS)</i> dengan <i>Bluetooth Low Energy</i>	Merancang sistem <i>Indoor Positioning System (IPS)</i> berbasis <i>Bluetooth Low Energy (BLE)</i> dengan metode trilaterasi untuk	Penelitian ini berbeda karena tidak hanya berfokus pada autentikasi akses, tetapi menekankan pada sistem

No.	Penulis & Tahun	Judul Jurnal	Fokus Utama Penelitian	Perbedaan / Kontribusi Pada Penelitian Ini
		(BLE) untuk Autentikasi Akses Karyawan Menggunakan Metode Trilaterasi	otentikasi akses karyawan. Sistem memanfaatkan RSSI untuk estimasi posisi serta diintegrasikan dengan autentikasi tambahan berupa NFC dan <i>fingerprint</i> . Sistem diuji pada ruangan <i>indoor</i> dan menunjukkan peningkatan akurasi posisi serta efektivitas keamanan akses.	monitoring posisi pekerja secara <i>real-time</i> berbasis UWB dengan metode <i>ranging</i> (ADS-TWR) yang memiliki tingkat akurasi lebih tinggi dibanding BLE. Selain itu, sistem yang dikembangkan mengintegrasikan fungsi autentikasi akses dan pemantauan posisi pekerja secara <i>real-time</i> .
3.	Klemen Bregar, 2023	<i>Indoor UWB Positioning and Position Tracking Data Set</i>	Penelitian ini menyediakan dataset UWB untuk pelokasian dan pelacakan posisi <i>indoor</i> yang digunakan sebagai referensi dalam evaluasi performa algoritma positioning. Studi ini menunjukkan potensi UWB sebagai teknologi yang sesuai untuk lingkungan <i>indoor</i> , khususnya pada area yang tidak terjangkau GNSS.	Fokus utama dalam penelitian Klemen Bregar adalah dataset eksperimen, bukan pengembangan sistem lengkap.
4.	Al-Okby et al., 2024	<i>UWB-Based Real-time Indoor Positioning Systems: A Comprehensive Review</i>	Tinjauan komprehensif tentang IPS <i>real-time</i> berbasis UWB, termasuk berbagai algoritma dan solusi perangkat keras untuk pelacakan dan pelokalan objek secara akurat dalam lingkungan <i>indoor</i> .	Penelitian yang dilakukan Al-Okby et al., 2024 bersifat tinjauan teori umum dan tidak mengembangkan sistem nyata, maka untuk penelitian kali ini mengembangkan sistem nyata yang mengintegrasikan IPS UWB dengan Fitur autentikasi dan monitoring <i>real-time</i> berbasis web.

Berdasarkan hasil kajian terhadap beberapa penelitian terdahulu yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan bahwa teknologi *Ultra-Wideband* (UWB) terbukti mampu memberikan akurasi penentuan posisi yang tinggi untuk aplikasi *Indoor*

Positioning System (IPS). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada aspek evaluasi algoritma, performa sistem, atau penyediaan dataset, dan belum banyak yang mengarah pada implementasi sistem secara terintegrasi untuk kebutuhan aplikasi nyata, khususnya dalam konteks keamanan dan pemantauan pekerja. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengisi celah tersebut dengan mengembangkan sistem IPS berbasis UWB untuk pemantauan pekerja menggunakan metode trilaterasi dan pengukuran jarak TWR yang diintegrasikan dengan sistem autentikasi serta monitoring berbasis *website* secara *real-time*. Diharapkan, penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang lebih aplikatif dan relevan terhadap kebutuhan lingkungan industri.

2.2 Metode

Pada penelitian ini, penulis menerapkan beberapa metode dalam proses pengembangan dan perancangan alat. Penerapan metode ini memiliki peran penting untuk penulis sebagai dasar dalam pelaksanaan penelitian, setiap metode nantinya akan saling terintegrasi satu sama lain untuk mencapai tujuan penelitian yang telah ditetapkan. Sub-bab ini menyajikan penjelasan mengenai metode-metode yang digunakan dalam penelitian.

2.2.1 Indoor Positioning Sytem (IPS)

Indoor positioning system (IPS) merupakan suatu sistem yang biasanya digunakan sebagai penentuan posisi atau lokasi suatu objek di dalam ruangan. Sistem IPS dikembangkan untuk mengatasi permasalahan penentuan posisi di dalam ruang, di mana sinyal satelit seperti GPS tidak dapat diterima secara optimal. Penerapan sistem ini memberikan manfaat pada berbagai bidang, seperti navigasi, pelacakan objek, keamanan serta keselamatan. Sistem penentuan posisi dalam ruangan memiliki peran penting dalam membantu navigasi di dalam gedung/bangunan, di mana jarak antara pemancar dan perangkat penerima diukur untuk menentukan posisi pengguna atau objek. Ini digunakan untuk permasalahan umum yang sering terjadi di lingkungan *indoor*, seperti kesulitan dalam mengetahui lokasi saat berada dalam bangunan atau gedung (Purnamasari & Saputro, 2022). Dengan menerapkan teknologi nirkabel yang saat ini telah banyak terpasang pada berbagai macam bangunan

ataupun institusi seperti lembaga pendidikan, kantor, dan pusat perbelanjaan. Sistem ini mempunyai kemampuan dalam melakukan pelokasian posisi objek secara akurat di dalam ruangan. Selain itu, keberadaan IPS juga membuka berbagai peluang baru dalam sektor industri, IoT, dan bidang kesehatan (Che et al., 2023).

Dalam sistem penentuan posisi di dalam ruangan, berbagai teknologi komunikasi nirkabel yang umum dan banyak dimanfaatkan antara lain Wi-Fi, BLE, ZigBee, RFID, dan UWB. Masing-masing teknologi tersebut memiliki karakteristik yang berbeda dari sisi akurasi, jangkauan, konsumsi daya, maupun biaya implementasi. Perbedaan karakteristik ini menyebabkan pemilihan teknologi IPS harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi dan lingkungan implementasi. Berikut ini merupakan tabel perbandingan teknologi untuk *indoor positioning system* (IPS).

Tabel 2. 2 Perbandingan Teknologi untuk *Indoor Positioning System* (IPS)

Standard	UWB	Wi-Fi	BLE	ZigBee
IEEE Spec.	IEEE 802.15.4a	IEEE 802.11	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
Frekuensi	3,5 – 6.5 GHz	2,4 GHz; 5 GHz	2,402–2,480 GHz	868/915 MHz, 2,4 GHz
Max Signal Rate	110 Mb/s	54 Mb/s	1 Mb/s	54 Mb/s
Jangkauan	200 Meter (LoS), 10 – 30 meter (NLoS)	±100 m	70–100 m	Up to-100 m
Akurasi	Centimeter-level (10-30 cm)	1 - 10 m	Meter-level	Meter-level
Power Consumption	Sedang-tinggi	Medium	Rendah	Rendah
Bandwidth	500 MHz – 7.5 GHz	22 MHz	1 MHz	22 MHz
NLoS Performa	Mampu menembus hambatan dengan baik	Daya tembus terbatas terhadap hambatan	Daya tembus terbatas terhadap hambatan	Daya tembus terbatas terhadap hambatan
Kelebihan	Akurasi sangat tinggi, tahan <i>multipath</i> , stabil untuk <i>indoor</i>	Infrastruktur luas, mudah diimplementasikan, data rate tinggi	Hemat energi, murah	Efisien energi, cocok untuk IoT
Kelemahan	Biaya lebih mahal, sistem lebih kompleks	Akurasi rendah, sensitif <i>multipath</i> , kurang presisi	Akurasi terbatas, terpengaruh kondisi lingkungan	Akurasi rendah, sangat dipengaruhi <i>multipath</i> dan noise

(Sumber: Che et al., 2023; NeedCode.io; qorvo.com)

Berdasarkan perbandingan pada Tabel 2. 2 dapat diketahui bahwa setiap teknologi *Indoor Positioning System* (IPS) memiliki karakteristik dan keunggulan masing-masing. Teknologi selain UWB masih memiliki keterbatasan utama pada aspek akurasi, yang sebagian besar hanya berada pada tingkat meter. Sementara itu, teknologi *Ultra-Wideband* (UWB) menunjukkan performa paling unggul pada aspek akurasi. Dengan memanfaatkan bandwidth yang sangat lebar dan pulsa sinyal berdurasi sangat pendek, UWB mampu memberikan estimasi jarak dan posisi hingga tingkat sentimeter serta lebih tahan terhadap efek *multipath* dibandingkan teknologi nirkabel lainnya.

Oleh karena itu, pemilihan teknologi UWB pada penelitian ini dinilai paling sesuai dengan kondisi lingkungan pengujian dan kebutuhan sistem, khususnya untuk implementasi IPS dalam pemantauan posisi pekerja di dalam ruangan yang memerlukan tingkat ketelitian tinggi. Implementasi UWB memiliki keunggulan pada aspek akurasi dan keandalan menjadikan teknologi ini sebagai solusi yang tepat dan relevan untuk mencapai tujuan penelitian.

2.2.2 Autentikasi

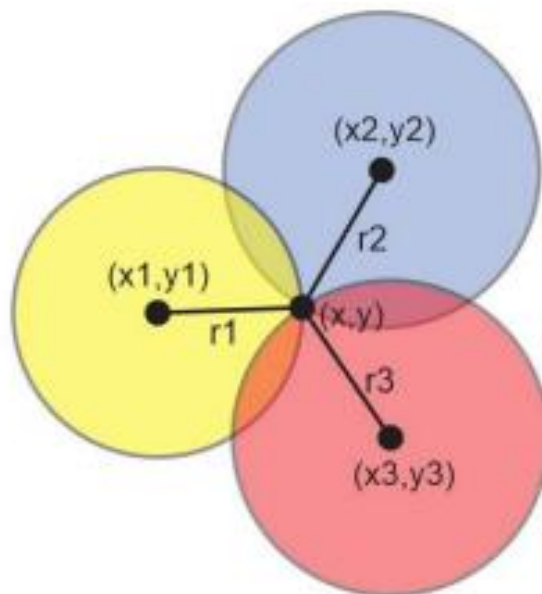
Autentikasi adalah proses untuk memastikan atau validasi identitas pengguna untuk mengakses sistem tertentu. Secara umum, proses autentikasi identitas dikelompokkan menjadi tiga berdasarkan faktor yang digunakan, yaitu faktor yang berkaitan dengan informasi yang hanya diketahui pengguna (*knowledge-based authentication*), faktor autentikasi berbasis kepemilikan (*posession-based authentication*), serta faktor autentikasi berbasis karakteristik (*inherence-based authentication*) memanfaatkan ciri biometrik yang melekat pada individu.

Salah satu jenis autentikasi yang berbasis pada karakteristik adalah autentikasi menggunakan sensor sidik jari. Autentikasi dengan *fingerprint* sensor memverifikasi identitas dengan memanfaatkan fitur biometrik berupa pola sidik jari, yang memiliki sifat unik, konsisten, dan sulit untuk dipalsukan. Proses verifikasi ini dilakukan dengan memindai gambar sidik jari pengguna melalui sensor biometrik, lalu mengonversinya menjadi template digital untuk tujuan identifikasi yang selanjutnya dilakukan proses pencocokan terhadap

basis data sidik jari yang telah terdaftar. Apabila nilai kecocokan yang dihasilkan telah melampaui ambang batas yang telah ditetapkan, maka identitas pengguna dinyatakan benar atau sah. Teknologi ini sering diterapkan pada berbagai sistem karena dinilai mampu memberikan tingkat keamanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Sensor sidik jari memiliki keunggulan dari sisi keunikan, tingkat keamanan, serta kemudahan bagi pengguna (Faizal Abdul Aziz et al., 2025).

2.2.3 Trilaterasi

Trilaterasi merupakan teknik geometri untuk penentuan posisi suatu objek yang dilakukan melalui pengukuran jarak dari minimal 3 titik acuan yang koordinatnya sudah diketahui (J et al., 2022). Metode ini bekerja berdasarkan prinsip perpotongan beberapa lingkaran yang dibentuk dari masing-masing hasil pengukuran jarak untuk penentuan lokasi suatu titik. Konsep penerapan metode ini ditunjukkan pada Gambar 2.1. Penerapan dari metode *trilateration* yaitu pada sistem navigasi dan penentuan posisi, seperti *Global Positioning System* (GPS), *Indoor Positioning System* (IPS) dimana metode *trilateration* bekerja dengan menghitung posisi objek berdasarkan perpotongan melalui titik temu dari tiga lingkaran.



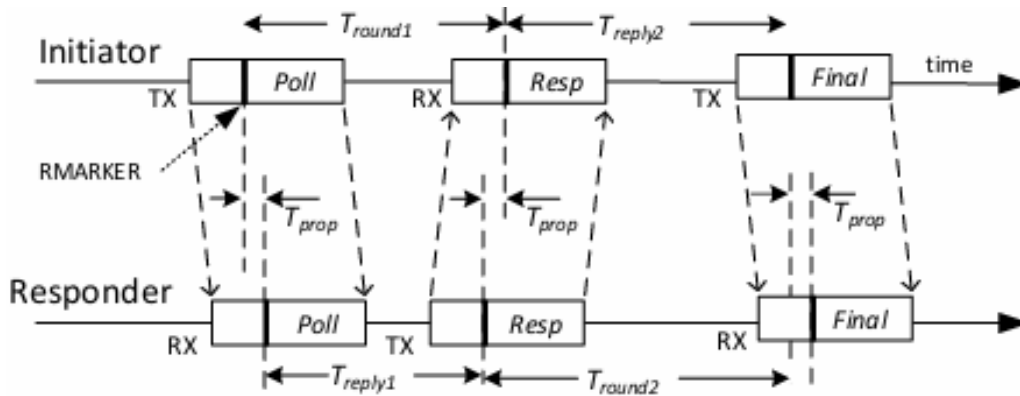
Gambar 2. 1 Ilustrasi Metode Trilaterasi
(Tamami, 2021)

Pada sistem IPS berbasis UWB, penentuan posisi umumnya dilakukan menggunakan metode triangulasi atau trilaterasi. Triangulasi menentukan posisi berdasarkan informasi sudut (*angle*) dan memerlukan perangkat keras yang mampu mengukur arah datang sinyal, seperti antena array atau sensor khusus, sehingga implementasinya lebih kompleks (Zang et al., 2024). Sementara itu, trilaterasi menentukan posisi berdasarkan hasil pengukuran jarak antara tag dan anchor yang telah diketahui koordinatnya. Metode trilaterasi sangat sesuai diterapkan pada teknologi UWB karena perhitungan posisi dilakukan berdasarkan hasil pengukuran jarak yang diperoleh dari *Time of Flight* (ToF) antara tag dan anchor. Dengan mengetahui koordinat anchor dan jarak hasil *ranging*, posisi tag dapat dihitung secara langsung menggunakan metode trilaterasi (Al-Okby et al., 2024b).

2.2.4 Two-Way Ranging

Metode *ranging* adalah teknik yang digunakan dalam penentuan jarak antara perangkat pemancar (*transmitter*) dan penerima (*receiver*), yang selanjutnya menjadi dasar dalam proses perhitungan posisi menggunakan metode *trilateration*. Terdapat beberapa metode *ranging* yang umum digunakan, di antaranya *Time of Flight* (ToF), *Time Of Arrival* (ToA), dan *Time Difference Of Arrival* (TDoA). Dalam penelitian ini, metode TWR yaitu metode pengukuran jarak berbasis *Time of Flight* (ToF) dipilih karena memiliki keunggulan dan kemampuan dalam meminimalkan kesalahan akibat ketidaksinkronan waktu antar perangkat.

Two-Way Ranging (TWR) adalah metode pengukuran jarak dua arah, di mana sinyal dikirim dan diterima secara bergantian antara dua perangkat untuk menghitung waktu tempuh. Pada penelitian ini, proses pengukuran jarak dilakukan menggunakan metode *Asymmetric Double-Sided Two-Way Ranging* (ADS-TWR). *Asymmetric Double-Sided Two-Way Ranging* (ADS-TWR) adalah sebuah protokol pengukuran jarak yang banyak diterapkan pada teknologi *Ultra-Wideband* (UWB) untuk memperkirakan waktu tempuh sinyal antar perangkat tanpa membutuhkan sinkronisasi waktu yang presisi antara keduanya (Ratjhe, Landsiedel, 2024).



Gambar 2. 2 Ilustrasi *Asymmetric Double-Sided Two-Way Ranging*

Asymmetrical Double-Sided Two-Way Ranging (ADS-TWR) merupakan metode pengukuran jarak pada sistem *Ultra Wideband* (UWB) yang menggunakan dua kali pertukaran pesan antara *node* initiator dan responder. Pada metode ini terdapat tiga jenis pesan, yaitu *poll*, *response*, dan *final*. Waktu propagasi sinyal atau ToF dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$T_{\text{prop}} = \frac{T_{\text{round1}} \times T_{\text{round2}} - T_{\text{reply1}} \times T_{\text{reply2}}}{T_{\text{round1}} + T_{\text{round2}} + T_{\text{reply1}} + T_{\text{reply2}}} \quad (2.1)$$

dengan:

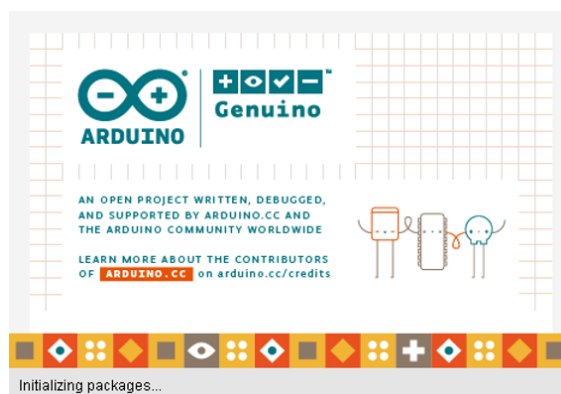
- T_{prop} = waktu propagasi sinyal satu arah antara *node* tag dan *node* anchor
- T_{round1} = waktu tempuh bolak-balik sinyal pada pengukuran pertama
- T_{reply1} = waktu balasan *node* penerima pada pengukuran pertama
- T_{round2} = waktu tempuh bolak-balik sinyal pada pengukuran kedua
- T_{reply2} = waktu balasan *node* penerima pada pengukuran kedua

2.3 Software

Pada sub-bab ini, penulis menjelaskan perencanaan pengembangan perangkat lunak atau *software* yang digunakan dalam implementasi alat pada tugas akhir ini. Perangkat lunak yang dipilih untuk digunakan pada penelitian berperan penting dalam mendukung proses penelitian, setiap *software* saling terintegrasi dan dirancang untuk mengelola serta menangani seluruh tahapan operasional sistem secara menyeluruh.

2.3.1 Arduino IDE (*Integrated Developement Environment*)

Arduino IDE merupakan *software open-source* yang digunakan sebagai pemrograman serta proses pengunggahan kode ke papan Arduino IDE. Melalui Arduino IDE, pengguna dapat mengembangkan juga membuat program untuk mikrokontroller Arduino dengan bahasa pemrograman yang digunakan berbasis bahasa C/C++ yang telah disederhanakan serta dilengkapi dengan berbagai *library* bawaan. *Software* ini dirancang untuk memudahkan pengguna dalam mengembangkan aplikasi berbasis mikrokontroler dengan menyediakan antarmuka yang jelas dan mudah dipahami, sehingga dapat digunakan oleh pemula maupun pengguna tingkat lanjut. Selain itu, Arduino merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menulis, membuka, mengedit, mengompilasi, dan mengunggah program ke dalam papan mikrokontroler Arduino (Azhar et al., 2024).



Gambar 2. 3 Arduino
(Data Pribadi, 2026)

2.3.2 Visual Studio Code

Visual Studio Code merupakan sebuah *text editor* yang bersifat ringan dan andal, dikembangkan oleh Microsoft serta dapat dijalankan pada berbagai sistem operasi (*multiplatform*), seperti Windows, macOS, dan Linux. *Software* ini secara bawaan mendukung pengembangan bahasa pemrograman JavaScript, *Node.js*, dan *Typescript*. Selain itu, *Visual Studio Code* juga dapat digunakan untuk berbagai bahasa pemrograman lain melalui pemasangan ekstensi atau plugin pada *Visual Studio Code marketplace*, seperti Python, Java, Go, C++, dan Java.

Visual Studio Code dirancang untuk memudahkan proses penulisan dan

pengelolaan kode program dengan menyediakan fitur-fitur penting, seperti penyorotan sintaks (*syntax highlighting*), *auto-completion*, manajemen ekstensi, serta integrasi terminal. Fitur-fitur tersebut membantu pengembang dalam meningkatkan efisiensi dan ketelitian selama proses pemrograman, serta memudahkan proses *debugging* ketika terjadi kesalahan pada kode program.



Gambar 2. 4 Logo *Visual Studio Code*
(visualstudio.com)

2.3.3 phpMyAdmin

phpMyAdmin merupakan perangkat lunak berbasis web yang dirancang untuk mengatur sistem basis data *open source* berbasis web yang dikembangkan dengan PHP juga memungkinkan pengguna untuk mengelola MySQL atau MariaDB melalui antarmuka di browser dengan mudah. Alat ini dibuat untuk membantu pengguna menjalankan berbagai tugas basis data tanpa harus mengetik perintah SQL secara langsung yang tidak terbiasa dengan SQL untuk tetap dapat mengelola *database* melalui antarmuka web yang intuitif. Melalui phpMyAdmin yang mendukung berbagai operasi MySQL, dapat mengatur *database*, tabel, kolom, hubungan (*relations*), indeks, pengguna (*users*), hak akses, dan sebagainya (Mahdiania *et al.*, 2022).



Gambar 2. 5 phpMyAdmin
(iconLogoVector.com, 2025)

2.4 Hardware

Hardware yang penting digunakan untuk menunjang proses perancangan, implementasi, serta pengujian dalam penelitian dijelaskan pada sub-bab ini. Hardware yang digunakan dapat ditemukan di toko *offline* ataupun *online*.

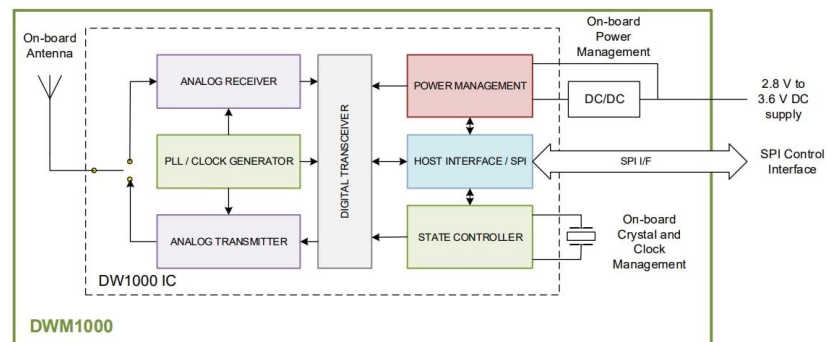
2.4.1 DWM1000

Modul DWM1000 adalah modul *transceiver* RF yang menggunakan teknologi *Ultra-Wideband*. Modul ini sudah terintegrasi dengan antena, rangkaian RF, rangkaian sistem manajemen daya, dan rangkaian pembangkit *clock*. DWM1000 dapat dimanfaatkan untuk mengukur jarak menggunakan metode *Two-Way Ranging* (TWR) dengan tingkat kepresisian mencapai ± 10 cm dan juga mendukung data rate mencapai 6,8 Mbps. Dengan karakteristik tersebut, modul ini mampu mendukung proses pertukaran data dengan kecepatan yang tinggi.



Gambar 2. 6 Modul DWM1000
(Qorvo.com, 2025)

Modul DWM1000 memanfaatkan *chip transceiver* berbasis CMOS RF yang hemat daya dan telah sesuai standar UWB IEEE 802.15.4-2011. Modul ini dilengkapi dengan kristal referensi 38.4 MHz dan tidak memerlukan desain RF tambahan karena di dalamnya sudah terintegrasi rangkaian analog RF beserta komponen pendukungnya. Struktur rangkaian pada modul DWM1000 dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Rangkaian Dalam Modul DWM1000
(mouser.co.id)

Tabel 2. 3 Spesifikasi Teknis Modul DW1000

Parameter	Spesifikasi
Standar Komunikasi	IEEE802.15.4-2011 UWB
Data Rates	110 kbps, 850 kbps, dan 6.8 Mbps
Frekuensi Operasi	3.5 GHz - 6.5 GHz
Akurasi Pengukuran Jarak	10-30 cm dalam kondisi <i>Line of Sight</i> (LoS)
Jangkauan (<i>Range</i>)	200 Meter (LoS), 10 – 30 meter (Non-LoS)
Konsumsi Daya	Mode Aktif: 125 mA
Tegangan Operasi	2.5V – 3.6V
Waktu Inisialisasi	< 2 ms
Interface Komunikasi	SPI (<i>Serial Peripheral Interface</i>)
Modulasi	Impulse Radio UWB
Ukuran Fisik	23 mm x 13 mm x 2.9 mm 24-pin <i>side-castellation package</i>

Sumber: DWM1000 Product Brief, Decawave

2.4.1.1 Ultra-Wide Band

Ultra-Wideband (UWB) merupakan teknologi yang dapat diterapkan dalam sistem penentuan posisi, khususnya untuk pelacakan objek bergerak di lingkungan *indoor*. Beberapa karakteristik UWB meliputi *bandwidth* yang sangat lebar, laju data yang sangat tinggi, jarak transmisi sinyal yang pendek, energi transmisi yang rendah, dan kemampuan penetrasi yang tinggi. Karakteristik ini menjadi sangat penting untuk akurasi penentuan posisi *indoor* presisi tinggi (Che et al., 2023). Teknologi UWB memanfaatkan sinyal dengan resolusi waktu yang tinggi, sehingga memungkinkan pengukuran waktu antara proses pengiriman dan penerimaan sinyal (*time of flight*). UWB menggunakan metode *Time of Flight* (ToF) dan *Time Difference of Arrival* (TDoA) yang memungkinkannya mencapai akurasi posisi di bawah 10 cm, jauh melampaui Bluetooth (BLE) atau Wi-Fi yang biasanya hanya mencapai akurasi tingkat meter. Kemampuan tersebut menjadikan UWB mampu menghasilkan estimasi posisi dengan tingkat presisi yang tinggi, karena perbedaan waktu transmisi yang sangat kecil dapat diidentifikasi secara akurat. Oleh karena itu, UWB banyak digunakan pada sistem *Indoor Positioning System* (IPS) yang menuntut ketelitian tinggi serta pemantauan secara *real-time* (Sultan, 2024) .

Dalam sistem penentuan posisi berbasis *Ultra-Wideband* (UWB), *node* UWB diklasifikasikan menjadi dua peran utama, yaitu *node* anchor dan tag. Anchor merupakan *node* UWB yang ditempatkan pada posisi tetap dengan nilai koordinat yang telah diketahui sebelumnya dan juga berfungsi untuk titik

acuan dalam proses *ranging*. Sementara itu, tag adalah *node* UWB yang bergerak dan dipasang pada suatu objek atau individu yang akan dilacak posisinya. Jangkauan single anchor dengan teknologi UWB dapat mencapai sekitar $\pm 200\text{m}$ dalam kondisi *line-of-sight* (LoS).

2.4.2 Fingerprint Sensor

Sensor sidik jari (*fingerprint*) merupakan sebuah perangkat biometrik yang digunakan untuk melakukan pengenalan identitas individu berdasarkan pada karakteristik pola sidik jari. Pola sidik jari terdiri dari susunan garis dan lekukan pada permukaan ujung jari yang bersifat khas untuk setiap orang, terbentuk secara alami sejak lahir, dan relatif tidak mengalami perubahan sepanjang waktu. Karakteristik tersebut menjadikan sidik jari sebagai parameter identifikasi yang unik dan konsisten dalam proses autentikasi pengguna. Oleh karena itu, teknologi *fingerprint* dikenal sebagai salah satu metode autentikasi biometrik yang menawarkan kemudahan penggunaan, kecepatan proses, serta tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional seperti penggunaan PIN atau kata sandi (Yu et al., 2023).

Pada penelitian ini, sensor sidik jari yang digunakan adalah *fingerprint* sensor AS608 yaitu jenis sensor optik yang memiliki kemampuan untuk menangkap citra sidik jari dengan resolusi yang cukup baik. Modul ini dilengkapi dengan prosesor internal yang mampu melakukan proses pencocokan data sidik jari secara mandiri tanpa membutuhkan beban komputasi besar dari mikrokontroler utama.

Keunggulan dari sensor AS608 adalah kemampuannya dalam menyimpan banyak template sidik jari dan kecepatan identifikasi yang relatif singkat. Selain itu, modul ini mendukung tingkat keamanan yang cukup baik karena data biometrik diproses secara internal. Sensor ini juga memiliki tingkat sensitivitas yang stabil pada berbagai kondisi penggunaan, meskipun performanya dapat dipengaruhi oleh kualitas permukaan jari, kelembapan, dan kebersihan sensor. Oleh karena itu, *fingerprint* sensor AS608 menjadi pilihan yang efektif untuk mendukung sistem keamanan modern yang membutuhkan

kombinasi antara kemudahan penggunaan dan tingkat proteksi yang tinggi.



Gambar 2. 8 *Fingerprint Sensor*
(tokopedia.com)

2.4.2.1 Akses *Fingerprint Sensor*

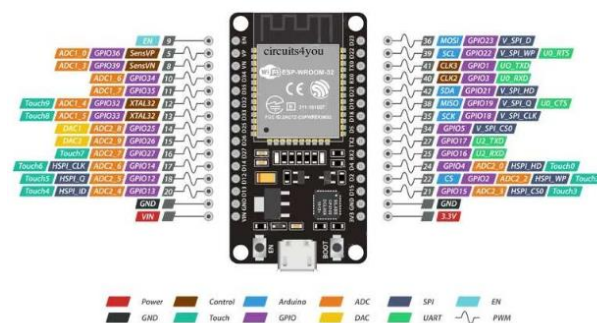
Pada tahapan proses yang mengatur bagaimana sensor sidik jari digunakan untuk melakukan pendaftaran dan verifikasi identitas pengguna, yaitu sensor akan berinteraksi dengan sistem pengendali untuk menerima perintah, membaca data sidik jari, serta mengirimkan hasil pencocokan kepada mikrokontroler. Proses akses ini memastikan bahwa setiap data biometrik yang diterima oleh sensor dapat diproses secara tepat dan aman sesuai dengan fungsi autentikasi yang dirancang.

Dalam implementasinya, akses terhadap *fingerprint sensor* dilakukan melalui komunikasi serial yang memungkinkan pertukaran data antara sensor dan mikrokontroler. Sistem akan memberikan izin akses apabila hasil pencocokan sidik jari sesuai dengan data yang telah tersimpan sebelumnya. Sebaliknya, jika sidik jari tidak terdaftar atau tingkat kecocokan tidak memenuhi ambang batas yang ditentukan, maka akses akan ditolak. Mekanisme ini berperan penting dalam menjaga keamanan sistem serta memastikan bahwa hanya pengguna yang berwenang yang dapat mengakses fitur atau layanan yang tersedia. Proses pembacaan sidik jari dimulai ketika pengguna menempatkan jari pada area sensor. Sensor kemudian melakukan pemindaian terhadap permukaan jari untuk mengambil citra atau membaca.

Tingkat akurasi sistem autentikasi sidik jari sangat bergantung pada kualitas citra yang diperoleh dari sensor dan keadaan sidik jari saat proses pemindaian (Cader et al., 2023).

2.4.3 ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler berperforma tinggi yang dikembangkan oleh *Espressif Systems* dan banyak digunakan dalam sistem tertanam (*embedded system*) serta aplikasi *Internet of Things* (IoT). Mikrokontroler ini mengintegrasikan prosesor, memori, modul komunikasi nirkabel, serta berbagai antarmuka input/output dalam satu chip, sehingga mampu mendukung sistem yang membutuhkan pemrosesan data dan komunikasi secara *real-time* dengan konsumsi daya yang relatif rendah (Kurnia Ar, 2025). ESP32 menggunakan prosesor Tensilica Xtensa LX6 32-bit dengan konfigurasi *dual-core* dan frekuensi hingga 240 MHz, yang memungkinkan eksekusi beberapa tugas secara paralel. Kemampuan ini menjadikan ESP32 cocok digunakan sebagai pengendali sistem yang harus menangani pembacaan sensor, komunikasi data, serta pengendalian aktuator secara simultan.



Gambar 2. 9 ESP32
(ardutech.com)

Gambar 2. 9 menampilkan visualisasi fisik ESP32 sedangkan Tabel 2.4 menyajikan spesifikasi teknis ESP32 yang digunakan dalam penelitian ini:

Tabel 2. 4 Spesifikasi ESP32

Spesifikasi	Keterangan
Produsen	<i>Espressif Systems</i>
Arsitektur CPU	<i>Tensilica Xtensa LX6 32-bit</i>
Jumlah Core	<i>Dual-core</i>
Frekuensi Clock	Hingga 240 Mhz
Memori ROM	448 KB
Memori SRAM	520 KB
Konektivitas Nirkabel	Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz), Bluetooth v4.2 BR/EDR
GPIO	Hingga 30 pin
Antarmuka	UART, SPI, I ² C, I ² S, CAN, PWM
Tegangan Operasi	3.0 – 3.6 V
Konsumsi Daya	Rendah
Aplikasi Umum	IoT, robotika, sistem kendali <i>real-time</i>

2.4.4 Relay

Relay adalah komponen elektro mekanis yang berfungsi sebagai *switch* yang dioperasikan secara listrik. Secara umum, relay terdiri dari dua bagian utama, yaitu kumparan *elektromagnet (coil)* dan kontak saklar mekanis. Ketika kumparan relay diberi tegangan, medan magnet akan terbentuk dan menarik kontak saklar sehingga terjadi perubahan kondisi dari terbuka (*normally open*) menjadi tertutup (*normally closed*) atau sebaliknya. Ketika tegangan dilepaskan, kontak akan kembali ke posisi semula (Rahmatina et al., 2023).

Pada penelitian ini, relay digunakan sebagai penghubung antara sistem kendali dan aktuator pengunci pintu. Relay berfungsi untuk mengendalikan mekanisme kunci pintu (*door lock*) yang memerlukan tegangan lebih besar, sementara sinyal kendali berasal dari mikrokontroler dengan tegangan rendah. Ketika proses autentikasi berhasil dan akses dinyatakan valid, mikrokontroler akan mengaktifkan relay sehingga kunci pintu terbuka dan pengguna dapat memasuki ruangan. Penggunaan relay memungkinkan pemisahan antara rangkaian kendali bertegangan rendah dan rangkaian daya, sehingga meningkatkan keamanan sistem serta melindungi komponen kendali dari potensi kerusakan akibat lonjakan arus atau gangguan listrik.



Gambar 2. 10 Relay
(digiwarestore.com)

2.4.5 Solenoid *Door lock*

Solenoid *door lock* adalah komponen elektronik yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Perangkat ini dioperasikan menggunakan tegangan kerja sebesar 5 volt. Dalam kondisi awal, solenoid berada pada

keadaan terkunci sehingga pintu tetap tertutup. Ketika diberikan suplai tegangan, mekanisme pengunci akan aktif dan menyebabkan kunci terbuka. Untuk mengendalikan *solenoid door lock* menggunakan ESP32, diperlukan rangkaian antarmuka atau driver sebagai penghubung, karena perbedaan karakteristik tegangan dan arus. Salah satu solusi yang umum digunakan adalah memanfaatkan relay 5 volt. Melalui relay tersebut, *solenoid door lock* dapat dikontrol secara tidak langsung oleh mikrokontroler ESP32 dengan aman dan efektif.



Gambar 2. 11 Solenoid Door lock
(digiware.com)

2.4.6 Limit Switch

Limit switch merupakan saklar elektromekanis yang berfungsi untuk mendeteksi posisi atau batas pergerakan suatu objek melalui kontak fisik antara aktuator saklar dengan benda yang bergerak. Ketika aktuator, seperti *roller lever*, *plunger*, atau tuas, menerima tekanan dari objek, kontak internal di dalam *limit switch* akan berubah kondisi dari *Normally Open* (NO) menjadi *Closed*, atau sebaliknya dari *Normally Closed* (NC) menjadi *Open*. Perubahan status kontak tersebut kemudian digunakan sebagai sinyal masukan bagi sistem kendali seperti *Programmable Logic Controller* (PLC) maupun mikrokontroler untuk menjalankan logika kontrol sesuai dengan kondisi yang telah diprogram. Karena bekerja berdasarkan kontak mekanis, *limit switch* memiliki tingkat keandalan yang tinggi untuk mendeteksi posisi akhir (*end position*) suatu mekanisme (Laksono, 2026).

Limit switch banyak diterapkan pada sistem otomasi industri sebagai sensor batas gerakan (*end-of-travel sensor*), pendeteksi keberadaan objek, sistem konveyor, mesin CNC, robot industri, elevator, serta berbagai peralatan manufaktur yang membutuhkan umpan balik posisi. Penggunaan *limit switch*

memungkinkan sistem menghentikan, memulai, atau mengubah arah gerakan aktuator secara otomatis ketika objek telah mencapai posisi tertentu.



Gambar 2. 12 *Limit Switch*
(digiware.com)

2.4.7 **OLED Display**

OLED (*Organic Light Emitting Diode*) adalah jenis dioda pemancar cahaya yang menggunakan material semikonduktor berbahan organik sebagai elemen utama pembentuk cahaya.. Lapisan semikonduktor organik tersebut ditempatkan di antara dua elektroda, di mana salah satu elektroda bersifat transparan sehingga cahaya dapat dipancarkan keluar. Modul OLED selanjutnya disusun membentuk layar tampilan dengan resolusi umum sebesar $128 \times 64 \text{ pixel}$. Teknologi OLED dikembangkan untuk menghasilkan media tampilan yang efisien, fleksibel, serta memiliki konsumsi daya yang relatif rendah, sehingga banyak digunakan dalam berbagai aplikasi sistem tampilan (Tanugraha, 2021).



Gambar 2. 13 *0,96 Inch OLED Display*
(electronicwings.com)

2.4.8 **Baterai Lithium Polymer (Li-Po)**

Baterai Lithium Polymer (Li-Po) merupakan salah satu jenis baterai sekunder berbasis lithium yang dapat diisi ulang dan banyak digunakan sebagai

sumber daya pada perangkat elektronik karena memiliki bentuk yang fleksibel, bobot relatif ringan, serta kemampuan menyediakan energi dalam ukuran yang kompak. Li-Po menggunakan elektrolit berbasis polimer dan termasuk dalam kelompok baterai lithium yang terus dikembangkan untuk aplikasi yang membutuhkan sumber energi dengan kepadatan energi tinggi dan bentuk yang fleksibel. Pengembangan teknologi baterai lithium polymer juga diarahkan untuk aplikasi seperti perangkat elektronik fleksibel dan *Internet of Things* (IoT). Pada penelitian ini, baterai Li-Po 1S dengan tegangan nominal 3,7 V digunakan sebagai sumber daya pada node tag.



Gambar 2. 14 Baterai Li-Po
(digiware.com)

2.4.9 Baterai Lithium-Ion (Li-Ion)

Baterai Lithium-ion (Li-ion) merupakan salah satu jenis baterai sekunder yang banyak digunakan pada perangkat elektronik portabel karena memiliki densitas energi yang tinggi, umur siklus yang panjang, serta tingkat *self-discharge* yang relatif rendah dibandingkan baterai konvensional (Liu et al., 2022). Baterai pada Gambar 2.15 merupakan tipe 18650 yang disusun dalam bentuk *pack*, dengan tegangan nominal sebesar 7,4 volt yang berasal dari dua sel Li-ion yang dirangkai secara seri. Baterai jenis ini banyak digunakan pada aplikasi seperti sistem *Internet of Things* (IoT), robotika, serta perangkat berbasis mikrokontroler karena mampu menyediakan sumber daya yang stabil dan efisien.

Baterai Li-ion bekerja berdasarkan perpindahan ion lithium antara anoda dan katoda selama proses *charge* dan *discharge*. Tegangan nominal satu sel baterai Li-ion umumnya sebesar 3,7 volt, dengan tegangan maksimum sekitar 4,2 volt saat terisi penuh dan batas minimum sekitar 3,0 volt untuk menjaga kinerja dan umur pakai baterai. Pada konfigurasi dua sel (2S),

tegangan nominal menjadi 7,4 volt dengan tegangan maksimum sekitar 8,4 volt. Keunggulan utama baterai Li-ion terletak pada efisiensi energi yang tinggi, ukuran yang relatif kompak, serta kemampuan pengisian ulang yang baik (Wang et al., 2022).



Gambar 2. 15 Baterai Li-ion
(tokopedia.com)

2.4.10 Push Button

Push button merupakan komponen saklar elektromekanis yang digunakan sebagai masukan (*input*) untuk memberikan perintah kepada suatu sistem kendali. Komponen ini bekerja berdasarkan tekanan mekanis pada tombol yang menyebabkan perubahan kondisi kontak listrik. Ketika tombol ditekan, kontak listrik akan berubah sehingga menghasilkan kondisi logika tertentu yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Setelah tekanan dilepaskan, kontak akan kembali ke kondisi awal. Penggunaan push button sebagai masukan pada sistem berbasis mikrokontroler banyak diterapkan untuk memberikan perintah secara langsung dari pengguna, seperti menjalankan, menghentikan, atau mengubah suatu proses pada sistem. Penerapan push button sebagai input pada sistem berbasis mikrokontroler dapat ditemukan pada penelitian yang menggunakan Arduino dan ESP32 untuk mengendalikan fungsi tertentu pada perangkat (Septianti & Rahmadewi, 2024).



Gambar 2. 16 Push Button
(tokopedia.com)

BAB 3

METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan dalam perancangan dan pengembangan *Indoor Positioning System* (IPS) menggunakan teknologi *Ultra-Wide Band* (UWB). Pembahasan meliputi alur dan tahapan penelitian yang disusun secara sistematis, mulai dari identifikasi masalah, studi literatur, perancangan sistem, hingga tahap implementasi dan pengujian. Metode penelitian ini dirancang untuk memastikan proses pengembangan sistem berjalan secara terstruktur, dan terukur. Selain itu, Bab 3 juga membahas perancangan dan integrasi sistem yang meliputi aspek mekanik, elektrik, dan perangkat lunak.

3.1 Konsep Penelitian

Konsep penelitian pada tugas akhir ini berfokus pada pengimplementasian sebuah *Indoor Positioning System* (IPS) yang terhubung dengan sistem autentikasi bertujuan untuk memantau pergerakan pekerja dan meningkatkan tingkat keamanan di lingkungan kerja. Sistem ini dirancang untuk memonitor pergerakan pekerja di dalam area tertutup dan hanya memberikan akses masuk kepada individu yang memiliki wewenang atau perangkat tertentu dalam ruang tersebut. Akses diberikan ketika seseorang berhasil melakukan autentikasi melalui sidik jari yang terhubung dengan tag yang dimiliki oleh pengguna. Proses autentikasi akan membandingkan informasi yang tersedia, dan apabila informasi tersebut sesuai, akses akan diberikan serta sistem akan diaktifkan. Sebaliknya, apabila data tidak sesuai, maka akses akan ditolak.

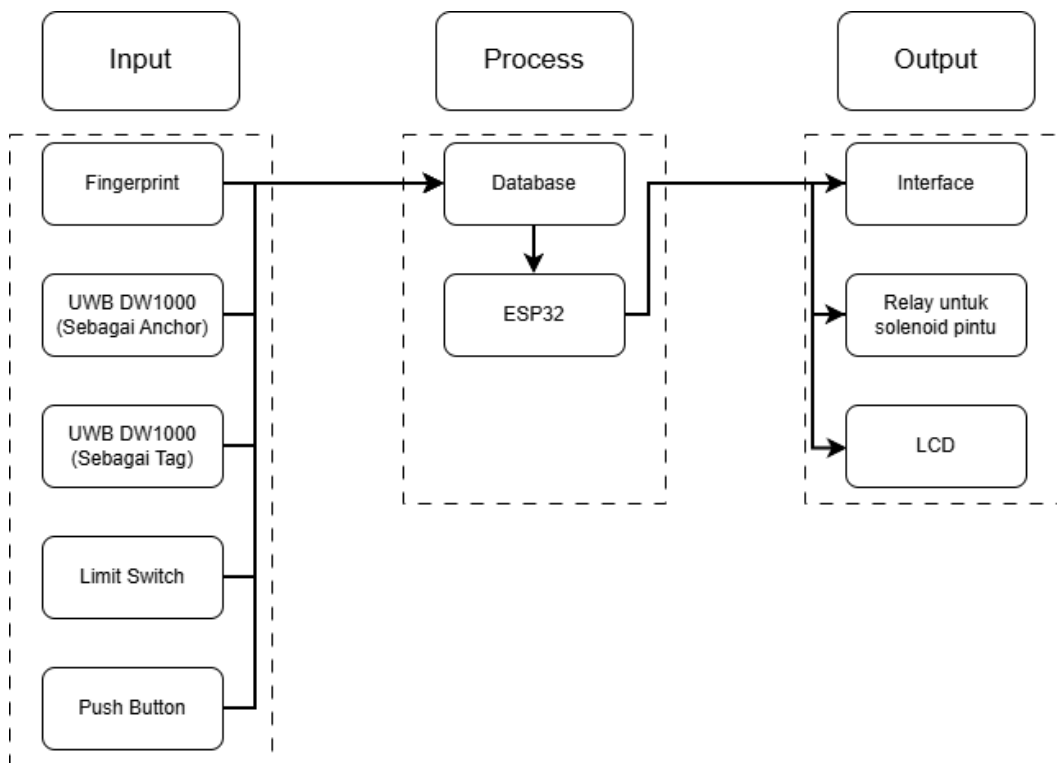
Setelah proses autentikasi berhasil sesuai dengan data, sistem akan mengaktifkan modul pemantauan menggunakan sensor *Ultra-Wideband* (UWB) untuk mendeteksi keberadaan tag yang dikenakan oleh pekerja di dalam ruangan. Saat sebuah tag terdeteksi, sistem akan menghitung posisi menggunakan metode trilateration, sehingga posisi atau koordinat pengguna dapat ditampilkan secara langsung melalui *interface*.

Seluruh tahapan ini terhubung dalam sistem *interface* yang dimana operator dapat memantau secara menyeluruh status akses, posisi pengguna, dan

keadaan keamanan ruangan. Melalui integrasi *Indoor positioning system* (IPS) yang memanfaatkan teknologi *Ultra-Wideband* (UWB) dan dilengkapi dengan proses autentikasi sidik jari, penelitian ini menawarkan solusi keamanan ruangan yang responsif dan akurat, yang dapat mengoptimalkan pemantauan di lingkungan industri.

3.2 Gambaran Umum Sistem

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 merupakan gambaran umum sistem secara keseluruhan dalam penelitian ini. Sistem dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu *input*, proses, dan *output*, yang saling terhubung. Gambaran umum sistem yang akan dibuat dalam penelitian ini berfungsi sebagai pedoman utama dalam merancang dan membangun sistem yang direncanakan. Dengan memberikan pemahaman menyeluruh mengenai sistem yang dikembangkan, diharapkan penelitian ini memiliki landasan yang kuat.



Gambar 3. 1 Gambaran Umum Sistem
(Data Penulis, 2026)

Dalam penelitian ini, sistem dikembangkan dengan memanfaatkan beberapa perangkat input utama, yaitu sensor sidik jari, empat modul UWB

DWM1000, *limit switch*, dan *push button*. Empat modul UWB DWM1000 terdiri atas tiga modul yang difungsikan sebagai *node anchor* dan satu modul sebagai *node tag*. Perangkat-perangkat tersebut digunakan dalam proses autentikasi, pengendalian akses pintu, pendeteksian dan pemantauan keberadaan pengguna yang menentukan lokasi secara *real-time*.

Sensor sidik jari digunakan sebagai perangkat verifikasi biometrik untuk memastikan pengguna yang akan memasuki ruangan telah terdaftar dan memiliki hak akses. Pengguna melakukan pemindaian sidik jari yang kemudian diverifikasi oleh ESP32 berdasarkan data yang tersimpan pada *database*. Apabila sidik jari sesuai, akses diterima dan relay mengaktifkan solenoid sehingga pintu dapat dibuka. Setelah pengguna masuk dan pintu kembali tertutup, kondisi tersebut dideteksi oleh *limit switch*. Sinyal dari *limit switch* menjadi penanda bahwa pintu telah tertutup sehingga sistem monitoring UWB DWM1000 diaktifkan untuk mendeteksi keberadaan *tag* pengguna di dalam ruangan. Sistem juga dilengkapi dengan *push button* yang digunakan sebagai input ketika pengguna ingin keluar dari ruangan. Ketika *push button* ditekan, relay mengaktifkan solenoid sehingga pintu dapat dibuka. Setelah pengguna keluar dan pintu kembali tertutup, kondisi tersebut dideteksi oleh *limit switch*. Selanjutnya, sistem monitoring UWB DWM1000 dihentikan karena pengguna telah keluar dari ruangan.

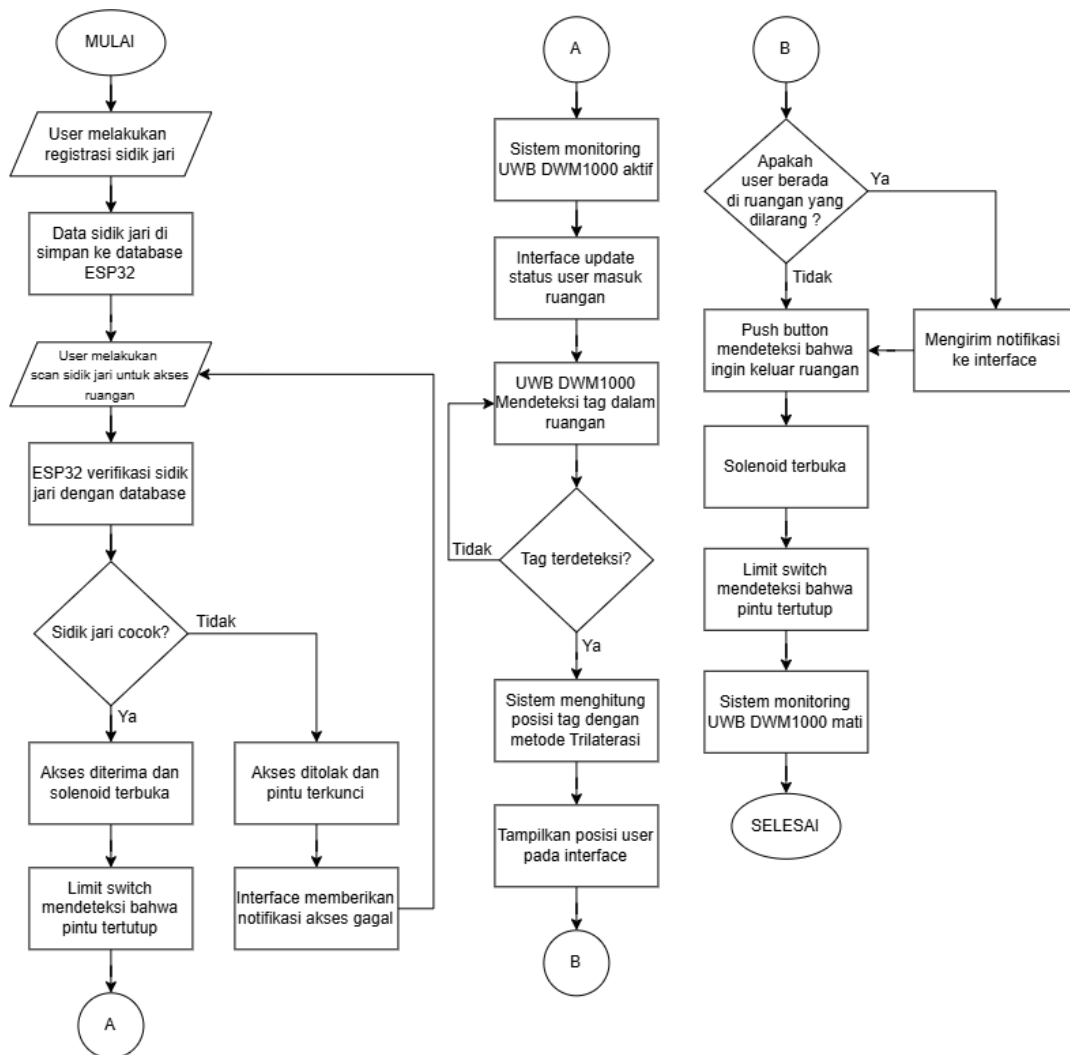
Data dari perangkat *input* kemudian diproses melalui integrasi *database* dan ESP32 yang berfungsi sebagai pusat pengendali sistem. *Database* digunakan untuk menyimpan data pengguna dan informasi yang diperlukan dalam proses autentikasi serta pemantauan posisi. Setelah pengguna berhasil masuk dan sistem monitoring aktif, modul UWB DWM1000 mendeteksi *tag* pengguna dan melakukan pengukuran jarak terhadap setiap *anchor*. Data jarak tersebut kemudian digunakan untuk menghitung posisi *tag* menggunakan metode trilaterasi. Hasil perhitungan posisi diteruskan ke *interface* untuk menampilkan posisi pengguna secara *real-time*. *Output* sistem terdiri atas *interface*, relay yang terhubung dengan solenoid pintu, dan LCD. *Interface* digunakan untuk menampilkan status pengguna dan posisi pengguna. Relay berfungsi mengendalikan solenoid, dan LCD pada *anchor* digunakan untuk menampilkan nilai jarak hasil pengukuran antara *anchor* dan *tag* secara *real-time*. Sementara itu,

LCD pada sistem autentikasi digunakan untuk menampilkan status proses verifikasi sidik jari, seperti “Masukkan Fingerprint” dan “Terverifikasi”.

Penelitian ini mengintegrasikan teknologi penentuan posisi, biometrik, dan deteksi gerakan dengan pengendalian mikrokontroler untuk menciptakan mekanisme autentikasi yang lebih tepat dan aman di lingkungan kerja.

3.3 Alur Kerja Sistem

Pada gambar alur kerja sistem menunjukkan rangkaian tahapan awal yang menggambarkan proses kerja sistem, dimulai sejak sistem pertama kali diaktifkan hingga seluruh proses selesai dijalankan. Setiap tahapan pada diagram tersebut merepresentasikan alur operasional sistem secara berurutan.



Gambar 3. 2 Alur Kerja Sistem
(Data Penulis, 2026)

Alur kerja ini dirancang untuk memastikan bahwa hanya pengguna yang terotorisasi yang dapat mengakses ruangan, serta memungkinkan sistem melakukan pemantauan posisi pengguna secara *real-time* disertai mekanisme peringatan notifikasi pada *interface* ketika terjadi pelanggaran area.

Tahap awal sistem dimulai dengan proses registrasi sidik jari pengguna. Pada tahap ini, pengguna melakukan perekaman sidik jari menggunakan sensor *fingerprint* yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32. Data sidik jari hasil perekaman kemudian disimpan ke dalam basis data internal ESP32 sebagai referensi untuk proses autentikasi pada penggunaan selanjutnya. Setelah data sidik jari tersimpan, sistem masuk ke tahap autentikasi pengguna. Pengguna melakukan pemindaian sidik jari untuk mendapatkan akses masuk ke ruangan. Data sidik jari yang terbaca oleh sensor akan diproses oleh ESP32 dan kemudian dibandingkan dengan data sidik jari yang telah tersimpan sebelumnya. Proses ini bertujuan untuk menentukan validitas identitas pengguna. Apabila hasil verifikasi menunjukkan bahwa sidik jari teridentifikasi dan sesuai, maka sistem memberikan akses masuk dengan mengaktifkan solenoid *door lock* sehingga pintu dapat terbuka. Setelah pengguna masuk dan pintu kembali tertutup, *limit switch* mendeteksi kondisi pintu tersebut sebagai indikator bahwa pintu telah tertutup. Selanjutnya, sistem mengaktifkan sistem monitoring UWB DWM1000 untuk melakukan pemantauan terhadap pengguna di dalam ruangan. Sebaliknya, apabila sidik jari tidak sesuai, akses masuk ditolak dan pintu tetap terkunci. *Interface* kemudian memberikan notifikasi bahwa proses autentikasi gagal, dan pengguna dapat melakukan pemindaian sidik jari kembali. Setelah sistem monitoring UWB DWM1000 aktif, sistem melakukan pendeteksian terhadap *tag* yang digunakan oleh pengguna. Apabila *tag* terdeteksi, sistem menghitung estimasi posisi pengguna menggunakan metode trilaterasi berdasarkan data jarak antara *tag* dan *anchor* UWB yang telah ditentukan posisinya. Hasil perhitungan koordinat posisi pengguna kemudian ditampilkan melalui *interface* sistem secara *real-time*. Apabila *tag* tidak terdeteksi, sistem kembali melakukan proses pendeteksian hingga *tag* pengguna berhasil terdeteksi. Selanjutnya, sistem melakukan evaluasi posisi pengguna terhadap pembagian zona ruangan yang telah ditentukan, yaitu zona yang diizinkan dan zona terlarang. Apabila pengguna terdeteksi berada di

dalam area yang diizinkan, sistem melanjutkan proses monitoring tanpa memberikan peringatan. Namun, apabila pengguna terdeteksi berada di dalam area yang dilarang, sistem mengirimkan notifikasi peringatan visual melalui *interface*. Notifikasi tersebut digunakan untuk memberikan informasi kepada operator bahwa pengguna berada pada area yang tidak diizinkan. Setelah pengguna selesai berada di dalam ruangan dan ingin keluar, pengguna menekan *push button* yang berfungsi sebagai input untuk membuka pintu dari dalam ruangan. Ketika *push button* ditekan, relay mengaktifkan solenoid *door lock* sehingga pintu dapat dibuka dan pengguna dapat keluar dari ruangan. Setelah pengguna keluar dan pintu kembali tertutup, kondisi pintu dideteksi oleh *limit switch*. Ketika *limit switch* mendeteksi bahwa pintu telah tertutup, sistem kemudian menghentikan proses monitoring UWB DWM1000. Dengan demikian, sistem tidak lagi melakukan pemantauan terhadap *tag* setelah pengguna keluar dari ruangan.

Dengan demikian, alur kerja sistem ini mengintegrasikan mekanisme keamanan berbasis biometrik dengan sistem pelacakan posisi *indoor* berbasis UWB, serta mekanisme deteksi pelanggaran area dalam satu sistem yang terstruktur dan terotomatisasi.

3.3.1 Algoritma *Asymmetric Double-Sided Two-Way Ranging*(ADS-TWR)

Untuk menentukan jarak untuk tugas akhir ini digunakan metode *Asymmetric-Double-Sided Two-Way Ranging* (ADS-TWR), yaitu salah satu algoritma pengukuran jarak berbasis *Time of Flight* (ToF). Metode ini dikembangkan untuk meningkatkan akurasi pengukuran jarak dengan mengurangi pengaruh *clock offset* dan *clock drift* antar perangkat UWB, yang menjadi salah satu sumber kesalahan utama pada metode *one-way ranging*. Metode ADS-TWR memanfaatkan dua kali proses pertukaran pesan antara *node tag* dan *node anchor* untuk mengurangi pengaruh waktu pemrosesan internal perangkat terhadap perhitungan waktu propagasi sinyal (Tamami et al., 2021).

Algoritma ADS-TWR melibatkan pertukaran pesan dua arah secara asimetris antara dua perangkat UWB, yaitu UWB device anchor dan UWB

device tag. Selama proses komunikasi tersebut, masing-masing perangkat secara otomatis merekam waktu pengiriman dan penerimaan paket menggunakan *timestamp* internal beresolusi tinggi. Dari *timestamp* ini diperoleh empat parameter waktu utama, yaitu T_{round1} dan T_{round2} yang merepresentasikan waktu *round-trip* sinyal serta T_{reply1} dan T_{reply2} yang merepresentasikan waktu *reply delay* atau waktu jeda pemrosesan balasan pada masing-masing perangkat. Dari keempat parameter waktu ini digunakan persamaan untuk menghitung waktu propagasi sinyal satu arah (T_{prop}).

$$T_{prop} = \frac{T_{round1} \times T_{round2} - T_{reply1} \times T_{reply2}}{T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2}} \quad (3.1)$$

dengan:

- T_{prop} = waktu propagasi sinyal satu arah antara *node* tag dan *node* anchor
- T_{round1} = waktu tempuh bolak-balik sinyal pada pengukuran pertama
- T_{reply1} = waktu balasan *node* penerima pada pengukuran pertama
- T_{round2} = waktu tempuh bolak-balik sinyal pada pengukuran kedua
- T_{reply2} = waktu balasan *node* penerima pada pengukuran kedua

Nilai T_{prop} selanjutnya dikonversikan menjadi jarak dengan mengalikan terhadap kecepatan cahaya, sehingga diperoleh jarak antara tag dan anchor. Nilai jarak yang diperoleh dari tiga anchor kemudian digunakan sebagai masukan dalam proses perhitungan posisi menggunakan metode trilaterasi.

Dengan algoritma *Asymmetric* DS-TWR mampu mengompensasi perbedaan *clock* antar perangkat, sehingga menghasilkan estimasi waktu propagasi yang lebih akurat. Proses perhitungan jarak pada sistem *Indoor Positioning System* (IPS) berbasis *Ultra-Wideband* (UWB) dengan metode *Asymmetric Double-Sided Two-Way Ranging* (ADS-TWR) dilakukan melalui beberapa tahapan yang saling berurutan. Tahapan ini dimulai dari pengambilan *timestamp* hingga diperolehnya nilai jarak antara anchor dan tag. Berikut ini merupakan tahapan perhitungan dengan metode ADS-TWR secara teori:

3.3.1.1 Perolehan *Timestamp*

Timestamp merupakan penanda waktu yang menunjukkan saat terjadinya proses pengiriman dan penerimaan sinyal pada sistem komunikasi.

Dalam *Indoor Positioning System* (IPS) dengan teknologi *Ultra-Wideband* (UWB), *timestamp* digunakan untuk dasar menghitung waktu tempuh sinyal (*Time of Flight*) yang selanjutnya digunakan dalam penentuan jarak.

Pada penelitian ini, *timestamp* diperoleh secara otomatis dari modul UWB DW1000 melalui mekanisme *hardware-based timestamping*, yaitu mekanisme pencatatan waktu pengiriman dan penerimaan paket yang dilakukan langsung oleh perangkat keras internal chip. Setiap kali modul mengirimkan paket UWB, waktu pengiriman dicatat pada register TX_TIME, sedangkan waktu penerimaan paket dicatat pada register RX_TIME. *Timestamp* yang dihasilkan memiliki resolusi tinggi sebesar 15,65 pikodetik. Nilai *timestamp* yang tersimpan pada register TX_TIME dan RX_TIME dibaca oleh mikrokontroler melalui antarmuka SPI. *Timestamp* ini masih berada dalam satuan *clock tick* internal DW1000 dan digunakan untuk menghitung selisih waktu antar kejadian pengiriman dan penerimaan paket. Selisih waktu tersebut kemudian dimanfaatkan untuk memperoleh parameter waktu *round-trip* dan *reply delay* yang digunakan dalam algoritma *Asymmetric Double-Sided Two-Way Ranging* (ADS-TWR).

3.3.1.2 Perhitungan Waktu Propagasi

Proses pengukuran ADS-TWR melibatkan pertukaran tiga paket data antara anchor dan tag, yaitu paket *poll*, *response*, dan *final*. Pada setiap proses pengiriman dan penerimaan paket tersebut, modul DWM1000 secara otomatis mencatat nilai *timestamp* pada register TX_TIME dan RX_TIME. *Timestamp* ini kemudian digunakan untuk menghitung selisih waktu yang merepresentasikan waktu perjalanan sinyal bolak-balik (*round-trip time*) dan waktu tunda respon (*reply delay*).

Berdasarkan hasil pencatatan *timestamp*, diperoleh empat parameter waktu utama, yaitu T_{round1} , T_{reply1} , T_{round2} , dan T_{reply2} . Parameter T_{round1} merupakan selisih waktu antara pengiriman paket *poll* oleh anchor dan penerimaan paket *response* dari tag, sedangkan T_{reply1} merupakan waktu tunda respon tag setelah menerima paket *poll*. Parameter T_{round2} merupakan selisih waktu antara pengiriman paket *response* oleh tag dan penerimaan paket *final*,

sedangkan T_{reply2} merupakan waktu tunda respon anchor sebelum mengirimkan paket final. Untuk memperoleh waktu propagasi sinyal satu arah (*Time of Flight*), digunakan persamaan pada ADS-TWR (3.1).

Misalkan diperoleh data *timestamp* hasil pembacaan register DWM1000 sebagai berikut (dalam nanodetik):

- $T_{round1} = 520 \text{ ns}$
- $T_{reply1} = 200 \text{ ns}$
- $T_{round2} = 540 \text{ ns}$
- $T_{reply2} = 220 \text{ ns}$

Maka waktu propagasi sinyal adalah:

$$\begin{aligned} T_{prop} &= \frac{520 \times 540 - 200 \times 220}{520 + 540 + 200 + 220} \\ &= \frac{236,800}{1,480} \\ &= 160 \text{ ns} \end{aligned}$$

3.3.1.3 Perhitungan Jarak dari Waktu Propagasi

Setelah nilai waktu propagasi sinyal satu arah (T_{prop}) diperoleh melalui metode *Asymmetric Double-Sided Two-Way Ranging* (ADS-TWR), tahap selanjutnya adalah menghitung jarak antara anchor dan tag. Perhitungan jarak didasarkan pada prinsip bahwa sinyal UWB merambat sebagai gelombang elektromagnetik dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya di udara. Dengan demikian, jarak dapat diperoleh dengan mengalikan waktu propagasi sinyal dengan kecepatan cahaya ($c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$), sebagaimana diterapkan dalam metode Time of Arrival pada sistem UWB (Ziegler et al., 2023).

Hubungan antara waktu propagasi sinyal dan jarak dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut:

$$d = T_{prop} \times c \tag{3.2}$$

dengan:

- d adalah jarak antara dua perangkat (meter),
- c adalah kecepatan cahaya di udara ($\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

Nilai waktu propagasi T_{prop} yang diperoleh dari perhitungan ADS-TWR awalnya masih dalam satuan waktu hasil konversi dari *timestamp* internal modul DWM1000. Nilai tersebut kemudian dikalikan dengan kecepatan cahaya untuk menghasilkan jarak dalam satuan meter. Proses perhitungan ini dilakukan secara otomatis oleh program pada mikrokontroler sebagai bagian dari sistem pengukuran jarak secara *real-time*.

Sebagai contoh, apabila diperoleh nilai waktu propagasi sinyal sebesar $T_{prop} = 160 \text{ ns}$, maka jarak antara anchor dan tag dapat dihitung dengan perhitungan pada persamaan (3.2) sebagai berikut:

$$d = 160 \times 10^{-9} \times 3 \times 10^8 = 48 \text{ m}$$

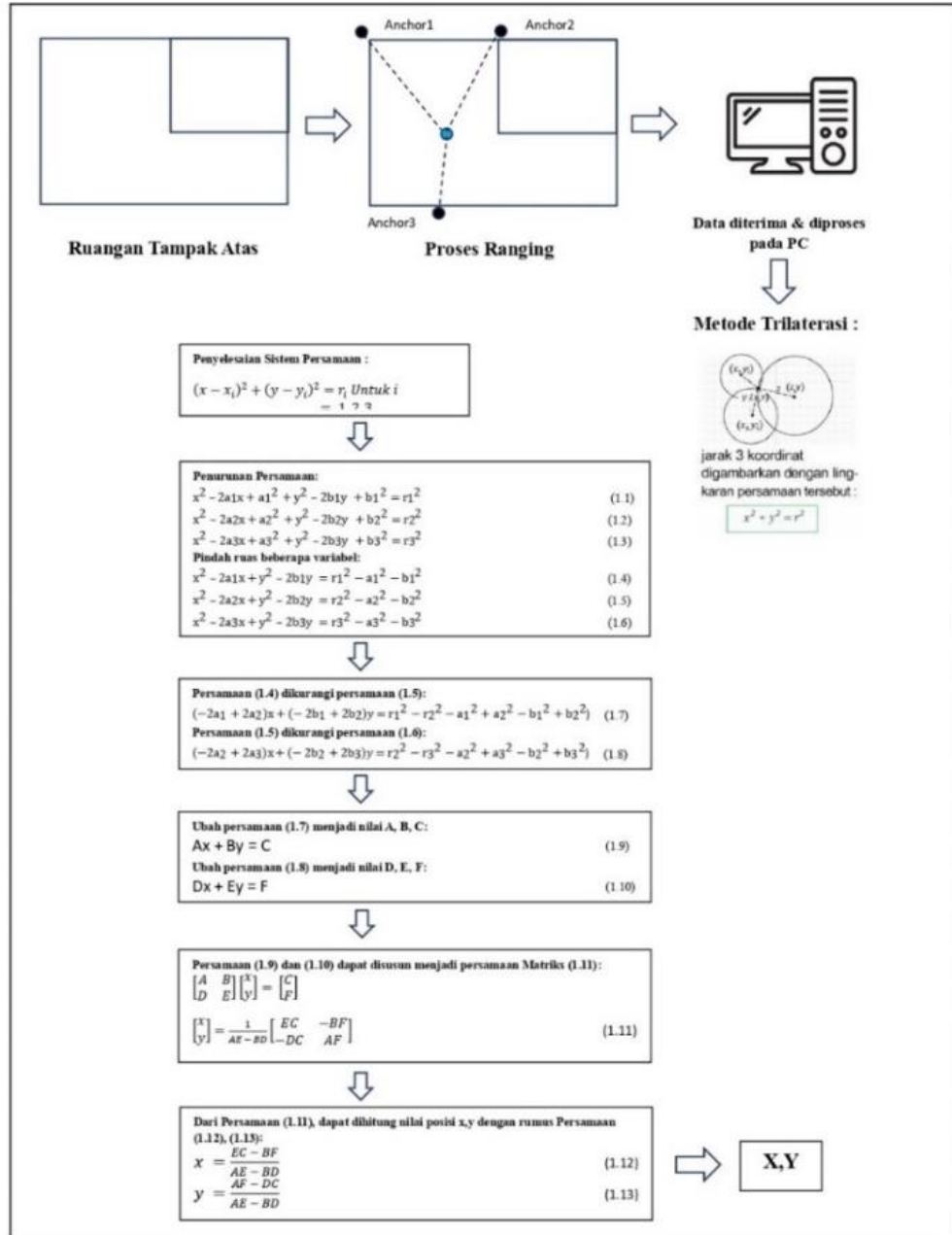
Nilai jarak yang dihasilkan dari tahap ini selanjutnya digunakan sebagai parameter input pada metode trilaterasi untuk menentukan posisi tag dalam bidang dua dimensi. Dengan demikian, perhitungan jarak dari waktu propagasi merupakan penghubung utama antara proses ranging berbasis UWB dan proses penentuan posisi pada sistem *Indoor Positioning System* (IPS).

3.3.2 Penentuan Posisi Menggunakan Metode Trilaterasi

Penerapan metode trilaterasi akan memberikan hasil yang optimal pada area berbentuk persegi dengan konfigurasi anchor membentuk pola segitiga. Metode ini memerlukan sedikitnya tiga *node* sebagai anchor dan satu *node* sebagai tag untuk memperoleh koordinat posisi pada sumbu x dan y. Dalam implementasi trilaterasi pada ruang dua dimensi, parameter ketinggian tidak diperhitungkan. Oleh karena itu, perbedaan ketinggian antara *node* anchor dan *node* tag tidak memengaruhi hasil estimasi posisi. Untuk mengetahui posisi pekerja, *node* tag harus dibawa atau digunakan oleh pekerja. Setelah data jarak diperoleh, informasi tersebut selanjutnya dikirimkan ke mikrokontroler utama, yaitu minimum sistem ESP32 melalui protokol komunikasi yang telah ditetapkan.

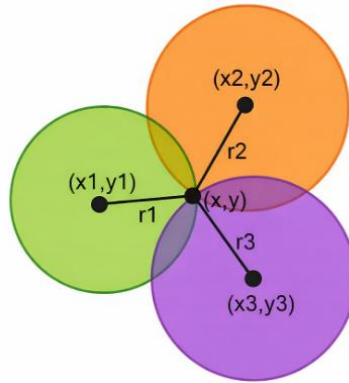
Proses penentuan posisi koordinat pekerja pada sumbu x dan y dilakukan secara otomatis oleh program pada komputer server menggunakan metode trilaterasi, kemudian hasil perhitungannya ditampilkan melalui web *interface*. Dalam perhitungan trilaterasi, diperlukan informasi koordinat posisi

anchor1 (x_1, y_1) , anchor2 (x_2, y_2) , dan anchor3 (x_3, y_3) pada bidang dua dimensi, serta data jarak antara pekerja yang membawa *node* tag terhadap masing-masing anchor, yaitu r_1 , r_2 , dan r_3 . Berikut disajikan alur sistem perhitungan posisi menggunakan metode trilaterasi pada gambar dibawah ini.



Gambar 3. 3 Alur perhitungan posisi
(Data Penulis, 2026)

Penurunan rumus trilaterasi yang siap digunakan diawali dengan membentuk persamaan lingkaran dari setiap titik referensi.



Gambar 3. 4 Ilustrasi Metode Trilaterasi
(Data Penulis, 2026)

Lingkaran dengan titik pusat (x, y) memiliki persamaan:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (3.3)$$

Dari persamaan tersebut diturunkan menjadi 3 persamaan lingkaran dengan titik pusat (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) dan radius r_1 , r_2 , r_3 . Titik (x, y) adalah titik yang dicari nilainya.

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \quad (3.4)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \quad (3.5)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2 \quad (3.6)$$

Kemudian Persamaan (3.4), (3.5), dan (3.6) diturunkan menjadi Persamaan (3.7), (3.8), dan (3.9).

$$x^2 - 2a_1x + a_1^2 + y^2 - 2b_1y + b_1^2 = r_1^2 \quad (3.7)$$

$$x^2 - 2a_2x + a_2^2 + y^2 - 2b_2y + b_2^2 = r_2^2 \quad (3.8)$$

$$x^2 - 2a_3x + a_3^2 + y^2 - 2b_3y + b_3^2 = r_3^2 \quad (3.9)$$

Pindah ruas beberapa variabel

$$x^2 - 2a_1x + y^2 - 2b_1y = r_1^2 - a_1^2 - b_1^2 \quad (3.10)$$

$$x^2 - 2a_2x + y^2 - 2b_2y = r_2^2 - a_2^2 - b_2^2 \quad (3.11)$$

$$x^2 - 2a_3x + y^2 - 2b_3y = r_3^2 - a_3^2 - b_3^2 \quad (3.12)$$

Persamaan (3.10) dikurangi (3.11)

$$(-2a_1 + 2a_2)x + (-2b_1 + 2b_2)y = r_1^2 - r_2^2 - a_1^2 + a_2^2 - b_1^2 + b_2^2 \quad (3.13)$$

Kemudian Persamaan (3.11) dikurangi (3.12):

$$(-2a_2 + 2a_3)x + (-2b_2 + 2b_3)y = r_2^2 - r_3^2 - a_2^2 + a_3^2 - b_2^2 + b_3^2 \quad (3.14)$$

Untuk menyelesaikan Persamaan (3.13) dan (3.14). Ubah Persamaan (3.13) menjadi nilai A, B, C, sesuai persamaan (3.15), dan Persamaan (3.14) menjadi nilai D, E, F sesuai dengan persamaan (3.16).

$$Ax + By = C \quad (3.15)$$

$$Dx + Ey = F \quad (3.16)$$

Kemudian Persamaan (3.15) dan (3.16) dapat disusun menjadi persamaan matriks (3.17).

$$\begin{bmatrix} A & B \\ D & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ F \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ D & E \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} C \\ F \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{AE - BD} \begin{bmatrix} E & -B \\ -D & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ F \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{AE - BD} \begin{bmatrix} EC - BF \\ -DC + AF \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Dari Persamaan (3.20), dapat dihitung nilai posisi x,y dengan rumus Persamaan (3.21), (3.22).

$$x = \frac{EC - BF}{AE - BD} \quad (3.21)$$

$$y = \frac{AF - DC}{AE - BD} \quad (3.22)$$

Setelah melakukan perhitungan dengan rumus di atas, nilai akan ditampilkan sebagai koordinat estimasi x dan y (Tamami, 2021).

3.3.3.1 Perhitungan Jarak dengan Trilaterasi

Sebagai contoh melakukan perhitungan jarak menggunakan metode *Asymmetric Double-Sided Two-Way Ranging* (ADS-TWR) dan selanjutnya menerapkan metode trilaterasi untuk mendapatkan koordinat posisi tag dapat dilihat pada contoh uraian perhitungan dibawah ini. Pada contoh perhitungan ini membutuhkan beberapa parameter. Parameter tersebut antara lain yaitu data *timestamp*, nilai T_{round1} , T_{round2} , T_{reply1} , T_{reply2} , dan T_{prop} .

Nilai *timestamp* diperoleh langsung dari register TX_TIME dan RX_TIME pada modul DWM1000 dalam satuan *tick*. Resolusi waktu

DWM1000 dalam 1 tick adalah 15,65 ps. Sebagai contoh permisalan hasil pembacaan register *timestamp* adalah sebagai berikut:

Anchor:

- $t_1 = 2.100.000$ tick (anchor mengirim *poll*)
- $t_4 = 2.134.000$ tick (anchor menerima *response*)
- $t_5 = 2.153.019,77$ tick (anchor mengirim *final*)

Tag:

- $t_2 = 1.850.000$ tick (tag menerima *poll*)
- $t_3 = 1.882.085$ tick (tag mengirim *response*)
- $t_6 = 1.902.975,89$ tick (tag menerima *final*)

Berdasarkan *timestamp* tersebut, diperoleh:

- $T_{round1} = t_4 - t_1 = 2.134.000 - 2.100.000 = 34,000$ tick
- $T_{reply1} = t_3 - t_2 = 1.882.085 - 1.850.000 = 32,085$ tick
- $T_{round2} = t_6 - t_3 = 1.902.975,89 - 1.882.085 = 20,89$ tick
- $T_{reply2} = t_5 - t_4 = 2.153.019,77 - 2.134.000 = 19,77$ tick

Menghitung waktu propagasi sinyal satu arah menggunakan rumus ADS-TWR pada persamaan (3.1) dengan substitusikan nilai pada persamaan tersebut.

$$T_{prop} = \frac{(34,000 \times 20,89) - (32,085 - 19,77)}{33,085 + 20,89 + 32,085 + 19,77} = 0,882 \text{ tick}$$

Konversi nilai T_{prop} yang didapatkan ke satuan waktu

$$T_{prop} = 0,882 \times 15,65 \text{ ps}$$

$$T_{prop} = 13,8033 \text{ ps} = 0,0138033 \text{ ns}$$

Setelah itu, jarak dihitung dengan mengalikan waktu propagasi dengan kecepatan cahaya dengan rumus pada persamaan (3.7).

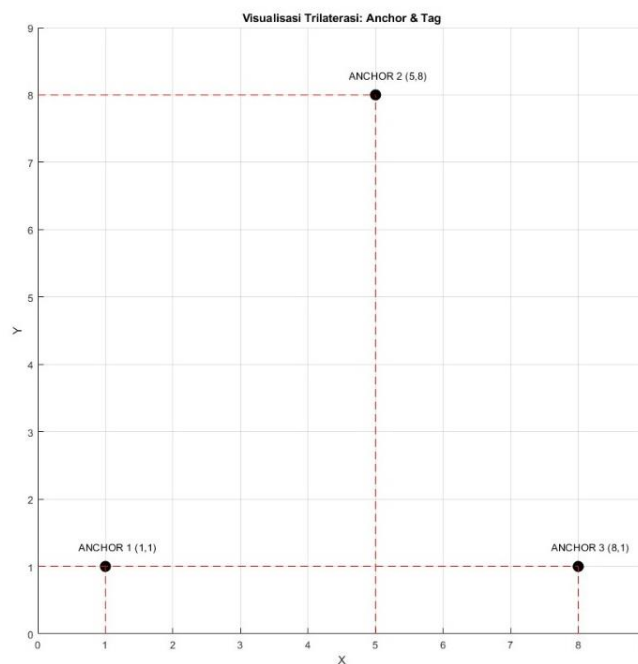
$$d = 0.0138033 \times 10^{-9} \times 3 \times 10^8$$

$$d = 0,00414 \text{ m}$$

Setelah mendapatkan jarak dari salah satu anchor terhadap tag, maka akan dihitung juga jarak dari perangkat UWB lainnya. Sebagai contoh didapatkan nilai jarak d_1, d_2, d_3 masing-masing adalah 2,49 Meter, 4,00 Meter, dan 3,60

Meter.

Setelah itu adalah menentukan posisi tag menggunakan rumus trilaterasi. Adapun parameter-parameter yang dibutuhkan untuk menggunakan rumus ini antara lain yaitu koordinat titik pusat setiap anchor (a_i, b_i). Sebagai contoh Anchor1 dengan koordinat titik pusatnya adalah (1,1), Anchor2 dengan koordinat titik pusatnya adalah (5,8), dan Anchor3 dengan koordinat titik pusatnya adalah (8,1). Untuk ilustrasi dari penempatan tiap Anchor sebagaimana terlihat pada gambar berikut.



Gambar 3. 5 Parameter Trilaterasi
(Data Pribadi, 2026)

Setelah menetapkan parameter yang diperlukan, maka kita dapat memasukkan nilai parameter tersebut ke persamaan (3.21) dan (3.22). Untuk parameter (3.21) kita bisa substitusikan parameter yang diperlukan. Untuk lebih rincinya dapat dilihat pada perhitungan sebagai berikut.

- $a_1 = 1, b_1 = 1, r_1 = 2,49 \text{ m}$
- $a_2 = 5, b_2 = 8, r_2 = 4,00 \text{ m}$
- $a_3 = 8, b_3 = 1, r_3 = 3,60 \text{ m}$

Sehingga:

$$A = -2a_1 + 2a_2 = -2(1) + 2(5)$$

$$B = -2b_1 + 2b_2 = -2(1) + 2(8)$$

$$C = r_1^2 - r_2^2 - a_1^2 + a_2^2 - b_1^2 + b_2^2 = (2,49)^2 - (4)^2 - (1)^2 + (5)^2 - (1)^2 + (8)^2$$

$$D = -2a_2 + 2a_3 = -2(5) + 2(8)$$

$$E = -2b_2 + 2b_3 = -2(8) + 2(1)$$

$$F = r_2^2 - r_3^2 - a_2^2 + a_3^2 - b_2^2 + b_3^2 = (4)^2 - (3,6)^2 - (5)^2 + (8)^2 - (8)^2 + (1)^2$$

Dari perhitungan diatas di dapatkan hasil sebagai berikut.

$$A = 8$$

$$B = 14$$

$$C = 77,2001$$

$$D = 6$$

$$E = -14$$

$$F = -20,96$$

Setelah mendapatkan nilai A, B, C, D, E, dan F. Kemudian mencari nilai x dan y menggunakan persamaan (3.27) dan (3.28).

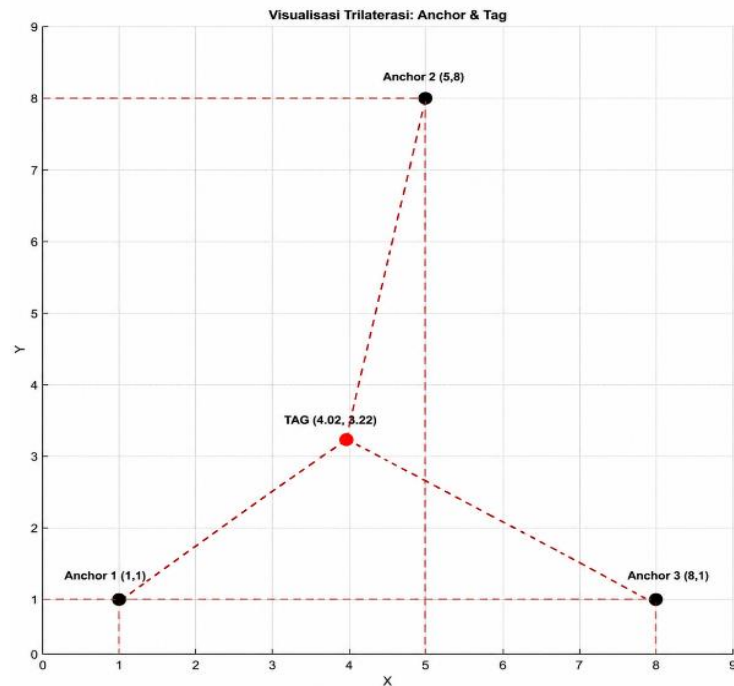
$$\begin{aligned} x &= \frac{(-14 \times (77,2001)) - (14 \times (-20,96))}{(8 \times (-14)) - (14 \times 6)} \\ &= \frac{(-1080,8014) - (-293,44)}{(-112) - (84)} \\ &= \frac{(-787,3614)}{(-196)} \\ &= 4.02 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{(8 \times (-20,96)) - (6 \times (77,2001))}{(8 \times (-14)) - (14 \times 6)} \\ &= \frac{(-167,68) - (463,2006)}{(-112) - (84)} \\ &= \frac{(-630,8806)}{(-196)} \\ &= 3,22 \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas didapatkan nilai x dan y yaitu:

$$x = 4,02 \text{ m}$$

$$y = 3,22 \text{ m}$$



Gambar 3. 6 Parameter Trilaterasi 2
(Data Pribadi, 2026)

Setelah melakukan perhitungan jarak dan menggunakan rumus metode trilaterasi seperti contoh diatas, maka diperoleh estimasi posisi tag berada pada koordinat (4,02 , 3,22).

3.3.3 Mekanisme Penentuan Status Keamanan Area Berbasis Posisi Tag

Sub-bab ini menjelaskan mekanisme sistem dalam menentukan apakah pengguna berada pada zona aman atau memasuki zona terlarang (area sekat) berdasarkan hasil estimasi koordinat posisi tag UWB. Mekanisme ini menjadi dasar dalam pemicu pengiriman notifikasi peringatan pada web *interface*.

Zona sekat didefinisikan sebagai area tertentu di dalam ruangan yang tidak boleh dimasuki oleh pengguna umum, meskipun pengguna tersebut telah berhasil melakukan autentikasi sidik jari dan membawa tag UWB yang valid. Akses ke zona ini hanya diperbolehkan bagi personel tertentu seperti operator atau pihak yang berwenang. Secara konseptual, zona sekat diperlakukan sebagai zona terlarang (*restricted zone*) yang dipantau secara kontinu oleh sistem *Indoor Positioning System* (IPS). Apabila sistem mendeteksi bahwa posisi pengguna berada di dalam zona tersebut, maka sistem akan memberikan peringatan berupa notifikasi visual pada web *interface*.

Mekanisme deteksi pelanggaran area pada sistem ini didasarkan pada hasil estimasi koordinat posisi pengguna yang diperoleh melalui metode trilaterasi. Setelah sistem menghitung posisi tag dalam bentuk koordinat (x, y), koordinat tersebut dibandingkan dengan batas wilayah zona ruangan yang telah ditentukan sebelumnya.

Penentuan status area dilakukan menggunakan logika berbasis batas koordinat (*rule-based geofencing*). Sistem akan mengklasifikasikan posisi sebagai area terlarang apabila nilai koordinat hasil estimasi memenuhi kondisi $x \geq 7,70$ meter dan $y \geq 2,11$ meter. Kondisi ini merepresentasikan bahwa tag telah berada pada wilayah kanan atas ruangan yang secara fisik merupakan area sekat. Untuk memperjelas pemetaan area, klasifikasi zona ruangan disajikan pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3. 1 Tabel Pemetaan Area Berdasarkan Koordinat Posisi Tag

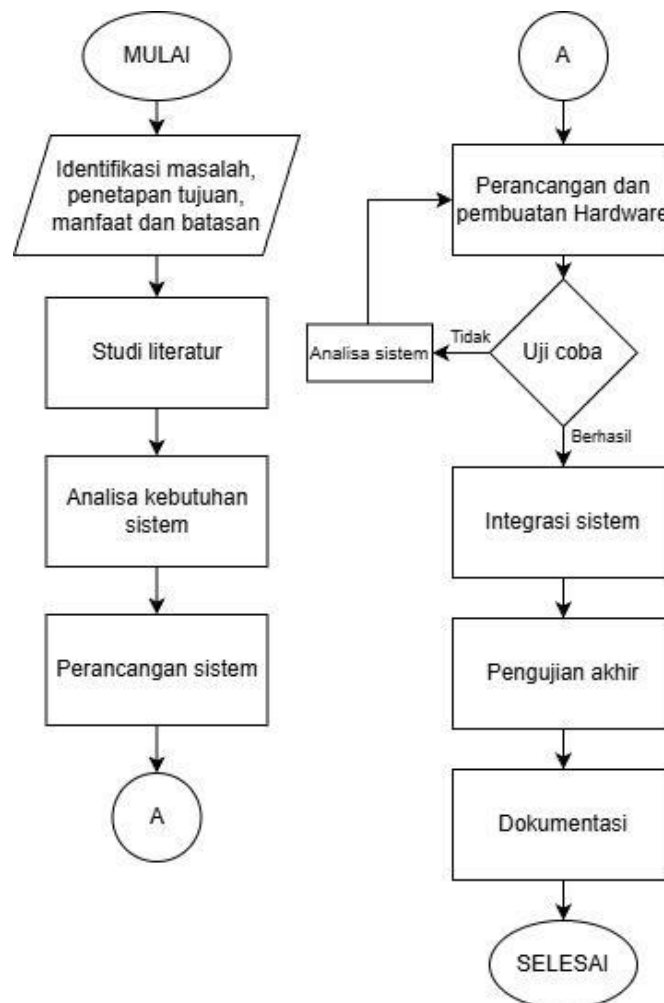
Kondisi Koordinat Posisi Tag	Klasifikasi Area	Status Sistem
$x \geq 7,70$ dan $y \geq 2,11$	Zona Terlarang (Sekat)	Bahaya
Selain kondisi di atas	Zona Aman	Aman

Apabila hasil perhitungan posisi tag berada di dalam rentang koordinat area terlarang, maka sistem secara otomatis mengidentifikasi bahwa pengguna telah memasuki zona yang tidak diizinkan. Selanjutnya, sistem akan memicu pengiriman notifikasi visual peringatan pada web *interface* sebagai bentuk deteksi pelanggaran akses berbasis lokasi. Pendekatan ini memungkinkan sistem melakukan pengawasan area secara digital (*geofencing indoor*) tanpa memerlukan sensor tambahan pada sekat, melainkan hanya berdasarkan hasil perhitungan koordinat posisi pengguna

3.4 Tahapan Penelitian

Diagram alir penelitian pada Gambar 3.7 menggambarkan tahapan pelaksanaan penelitian secara sistematis mulai dari tahap awal hingga akhir. Berdasarkan Gambar 3.7 proses dimulai dengan mengidentifikasi masalah dan melakukan studi literatur. Selanjutnya, melakukan analisis kebutuhan sistem untuk menentukan spesifikasi perangkat keras dan perangkat lunak yang diperlukan dalam pengembangan sistem. Lalu masuk ke tahap perancangan sistem dan dilanjut

dengan perancangan dan pembuatan hardware Setelah sistem berhasil dibuat, peneliti melakukan pengujian sistem untuk memastikan semua fungsinya berjalan dengan baik sesuai rencana. Jika hasil pengujian menunjukkan sistem berfungsi dengan baik. Terakhir, peneliti menyusun laporan akhir yang berisi dokumentasi dari setiap tahap penelitian tugas akhir.



Gambar 3. 7 Tahapan Penelitian
(Data Pribadi, 2026)

3.4.1 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah ditemukan dari hasil survei lapangan, diskusi, dan sumber literatur yang telah dibaca. Permasalahan yang diambil untuk penelitian yaitu terkait sistem pemantauan juga autentikasi atau keamanan yang ada pada kebanyakan lingkungan industri. Berdasarkan hasil survei lapangan, diskusi dengan pihak terkait, serta kajian literatur, diperoleh beberapa permasalahan yang menjadi dasar pelaksanaan penelitian ini. Permasalahan utama berkaitan

dengan efektivitas sistem pemantauan dan autentikasi yang umum diterapkan pada lingkungan industri. Saat ini, proses autentikasi pekerja masih didominasi oleh penggunaan kartu RFID atau pemeriksaan manual oleh petugas keamanan. Proses tersebut menimbulkan beberapa kendala, seperti penumpukan pekerja saat antri autentikasi, ketergantungan pada kartu fisik, serta potensi kesalahan identifikasi.

Selain itu, sistem pemantauan pekerja yang menggunakan CCTV juga memiliki sejumlah keterbatasan. Teknologi CCTV hanya menampilkan citra visual, sehingga tidak mampu memberikan informasi posisi pekerja secara presisi di dalam ruangan. Dalam kondisi tertentu, CCTV juga memiliki area blind spot, yaitu area yang tidak terjangkau oleh kamera, sehingga potensi ketidakterpantauan aktivitas pekerja tetap ada. Hal ini menyebabkan proses monitoring tidak dapat dilakukan secara menyeluruh dan *real-time* terhadap lokasi pekerja.

Di sisi lain, kebutuhan akan sistem yang mampu melakukan pelacakan posisi pekerja secara akurat dan *real-time* semakin penting dalam mendukung keamanan serta efisiensi operasional industri. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan penerapan *Indoor Positioning System* (IPS) berbasis teknologi *Ultra-Wideband* (UWB) dengan metode trilaterasi sebagai solusi untuk meningkatkan akurasi pelacakan sekaligus proses autentikasi. Sistem autentikasi yang akan diterapkan nanti akan memudahkan dalam pencocokan data tanpa harus menggunakan kartu atau hal yang sejenis seperti pada lingkungan industri lainnya, monitoring karyawan juga satu hal yang dapat memudahkan serta meningkatkan sistem keamanan. Karena dengan adanya monitoring dan sistem autentikasi, dapat mempermudah kerja *security*.

3.4.2 Studi Literatur

Selanjutnya adalah studi literatur, yang dilakukan dengan mengkaji jurnal ilmiah, buku referensi, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan sistem penentuan posisi dalam ruang, teknologi *Ultra-Wideband*, sistem autentikasi serta algoritma perhitungan. Hasil studi literatur digunakan sebagai dasar dan acuan dalam pemilihan metode dan perancangan sistem yang sesuai

dengan tujuan penelitian.

3.4.3 Analisa Kebutuhan Sistem

Analisa sistem dilakukan untuk memahami kebutuhan, karakteristik, serta alur kerja sistem yang akan dikembangkan dalam penelitian ini. Tahap analisa ini bertujuan agar perancangan sistem yang dibuat sesuai dengan permasalahan dan mampu menghasilkan kinerja yang optimal. Dilakukan analisis terhadap data dan teknologi yang dibutuhkan pada tahap ini. Data yang digunakan dapat berupa nilai posisi yang diperoleh dari hasil perhitungan jarak antara anchor dan tag dengan menerapkan metode trilaterasi. Adapun komponen pada sistem yang diperlukan mencakup:

Tabel 3. 2 Komponen Sistem *Hardware*

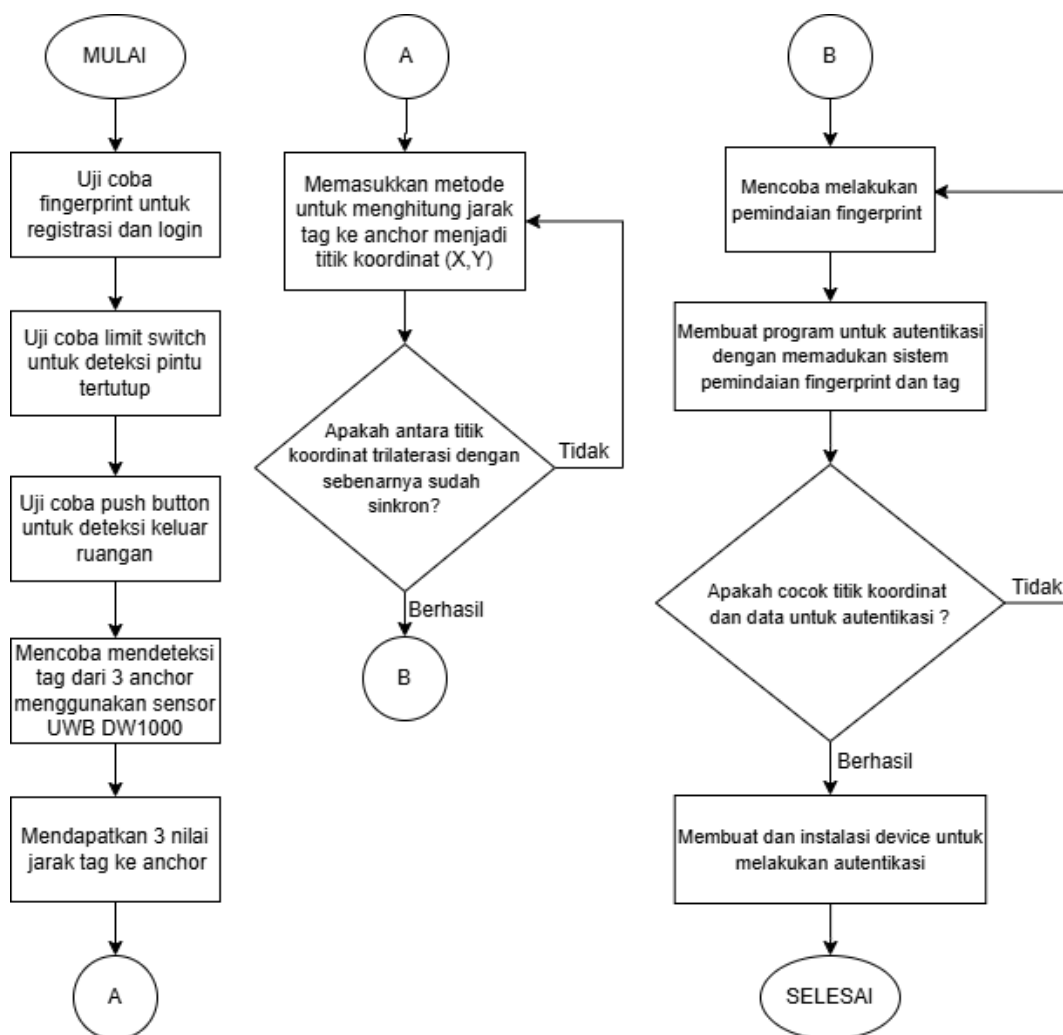
No	<i>Hardware</i>	Jumlah
1	Laptop	1 Unit
2	Modul DWM1000	4 Unit
3	ESP32	6 Unit
4	<i>Fingerprint Sensor</i>	1 Unit
5	Relay	1 Unit
6	<i>Solenoid Door lock</i>	1 Unit
7	<i>Limit Switch</i>	1 Unit
8	<i>Push Button</i>	1 Unit
9	<i>OLED Display</i>	4 Unit
10	<i>Battery Li-Ion</i>	3 Unit
11	<i>Battery Li-Po</i>	1 Unit

Berdasarkan Tabel 3.2 komponen perangkat keras yang digunakan dalam perancangan sistem terdiri atas perangkat pemrosesan, pengukuran, autentikasi, pengendalian akses, dan pendukung sistem. Laptop digunakan untuk pemrograman, pengolahan data, dan pemantauan sistem melalui *interface*. Modul DWM1000 digunakan untuk sistem *Indoor Positioning System* (IPS), dengan tiga modul sebagai *anchor* dan satu modul sebagai *tag* untuk memperoleh data jarak yang digunakan dalam perhitungan posisi menggunakan metode trilaterasi. ESP32 berfungsi sebagai mikrokontroler untuk mengendalikan proses autentikasi, komunikasi, dan pengolahan data sistem. *Fingerprint sensor* digunakan untuk registrasi dan verifikasi identitas pengguna, sedangkan *relay* dan *solenoid door lock* digunakan untuk mengendalikan akses pintu. *Limit switch* berfungsi sebagai input untuk mendeteksi kondisi pintu tertutup, sementara *push button* digunakan sebagai

input untuk memberikan perintah ketika pengguna ingin keluar dari ruangan. OLED *display* digunakan untuk menampilkan informasi seperti status autentikasi dan nilai jarak UWB, sedangkan baterai Li-Ion dan Li-Po digunakan sebagai sumber catu daya pada perangkat node. Seluruh komponen tersebut diintegrasikan untuk mendukung proses autentikasi, pengendalian akses pintu, pengukuran jarak UWB, perhitungan posisi, dan pemantauan pengguna dalam sistem yang dikembangkan.

3.5 Skenario Pengujian

Skenario pengujian disusun untuk memastikan bahwa seluruh fungsi sistem dapat berjalan sesuai dengan perancangan. Gambar 3.8 menunjukkan skenario pengujian dalam penelitian ini.



Gambar 3. 8 Skenario Pengujian
(Data Pribadi, 2026)

Berdasarkan *flowchart* diatas, skenario pengujian dimulai dengan mencoba *fingerprint* untuk registrasi dan login, sebagai langkah awal verifikasi identitas pengguna. Selanjutnya, dilakukan pengujian *limit switch* untuk mendeteksi kondisi pintu tertutup dan pengujian *push button* untuk mendeteksi perintah pengguna ketika akan keluar dari ruangan. Setelah fungsi perangkat tersebut diuji, dilakukan pengujian deteksi tag yang berfungsi untuk mengidentifikasi lokasi pengguna. Pada tahap ini, sensor UWB DWM1000 digunakan untuk mendeteksi jarak antara tag dan tiga anchor yang ditempatkan di lokasi berbeda.

Proses berikutnya adalah mendapatkan tiga nilai jarak antara tag dan anchor yang digunakan untuk menghitung koordinat tag dalam sistem koordinat (x, y). Metode trilaterasi diterapkan untuk menghitung posisi tag berdasarkan jarak yang terukur. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan apakah titik koordinat yang dihitung menggunakan metode trilaterasi sudah sesuai dan sinkron dengan pengukuran sebenarnya yang diperoleh. Jika hasil perhitungan titik koordinat sudah sesuai, maka pengujian diteruskan ke tahap berikutnya.

Tahap selanjutnya, dilakukan pengujian integrasi antara sistem autentikasi *fingerprint* dengan sistem *Indoor Positioning System* (IPS). Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sidik jari yang berhasil diverifikasi akan mengaktifkan secara otomatis proses monitoring posisi. Keberhasilan integrasi ditunjukkan dengan munculnya *node* tag pada halaman *website* monitoring serta ditampilkannya koordinat posisi hasil perhitungan metode trilaterasi. Sebaliknya, apabila sidik jari tidak dikenali, sistem tidak mengaktifkan proses monitoring sehingga *node* tag tidak ditampilkan pada *website*.

Setelah tahap autentikasi selesai dan terbukti sesuai, langkah selanjutnya adalah pembuatan dan instalasi perangkat yang digunakan untuk melakukan autentikasi secara langsung. Proses ini memastikan bahwa sistem autentikasi yang diuji dapat diterapkan dalam implementasi nyata, dengan hasil yang dapat digunakan untuk pengamanan lokasi berdasarkan autentikasi biometrik. Setelah seluruh proses diuji dan dinyatakan berhasil, sistem autentikasi dapat dianggap selesai dan siap untuk digunakan dengan dilengkapi pemantauan pekerja pada *interface*.

Dengan adanya skenario pengujian ini, diharapkan sistem yang

dikembangkan telah melalui tahapan validasi fungsional dan teknis sehingga dapat beroperasi sesuai dengan tujuan penelitian.

3.5.1 Parameter Evaluasi Kinerja Sistem

Kinerja sistem *Indoor Positioning System* (IPS) berbasis *Ultra-Wideband* (UWB) pada penelitian ini dievaluasi berdasarkan kemampuan sistem dalam mengestimasi posisi pekerja pada lingkungan *indoor*. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil estimasi posisi yang diperoleh sistem terhadap posisi sebenarnya pada setiap titik pengujian. Pada setiap titik pengujian dilakukan pengambilan data sebanyak minimal 5 kali pengukuran. Pengambilan data secara berulang bertujuan untuk memperoleh data yang lebih representatif serta mengetahui konsistensi hasil estimasi posisi yang dihasilkan sistem. Selain itu, pengulangan pengukuran juga memungkinkan dilakukan analisis terhadap variasi nilai *error* yang muncul akibat pengaruh kondisi lingkungan *indoor*, seperti adanya penghalang, pantulan sinyal (*multipath*), maupun perubahan orientasi perangkat UWB.

Parameter yang digunakan dalam mengevaluasi kinerja sistem adalah persentase *error* dan *Mean Absolute Error* (MAE). Persentase *error* digunakan untuk mengetahui besarnya penyimpangan hasil pengukuran terhadap nilai sebenarnya pada setiap pengujian. Persentase *error* pengukuran jarak dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Error(\%) = \frac{|Jarak_{sensor} - Jarak_{real}|}{Jarak_{real}} \times 100\% \quad (3.23)$$

Untuk mengetahui tingkat kesalahan pengukuran secara keseluruhan digunakan metode *Mean Absolute Error* (MAE). MAE merupakan rata-rata nilai absolut selisih antara hasil pengukuran sensor dengan nilai sebenarnya. Penggunaan MAE dipilih karena mampu memberikan ukuran kesalahan rata-rata yang mudah diinterpretasikan tanpa dipengaruhi oleh arah kesalahan, baik kesalahan bernilai positif maupun negatif. Dengan demikian, MAE dapat memberikan gambaran mengenai tingkat akurasi sistem secara keseluruhan selama proses pengujian. Perhitungan MAE dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i| \quad (3.24)$$

dengan:

- n = jumlah data pengujian
- x_i = jarak sebenarnya
- $\hat{x}_i$ = hasil sensor

Hasil perhitungan persentase *error* dan MAE selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menganalisis performa sistem pada setiap skenario pengujian. Semakin kecil nilai *error* dan MAE, semakin baik tingkat akurasi sistem dalam mengestimasi posisi. Sebaliknya, nilai *error* yang lebih besar menunjukkan adanya penyimpangan hasil pengukuran akibat pengaruh kondisi lingkungan dan propagasi sinyal UWB.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa teknologi UWB untuk sistem *indoor positioning* mampu mencapai akurasi pada rentang sub-meter hingga sekitar 1 meter dalam kondisi lingkungan *indoor* nyata. Sebagai contoh, jurnal (Jung et al., 2025) yang melaporkan rata-rata ranging *error* UWB sekitar 0,28 m hingga 1,11 m dalam uji di lingkungan *indoor* nyata dengan berbagai kondisi propagasi sinyal, menunjukkan akurasi sub-meter untuk sebagian besar skenario pengukuran. Evaluasi lain di lingkungan industrial menemukan average localization *error* 0,3–0,6 m dengan sistem UWB, mendukung kemampuan sub-meter positioning dibandingkan teknologi lain (Crețu-Sîrcu et al., 2022).

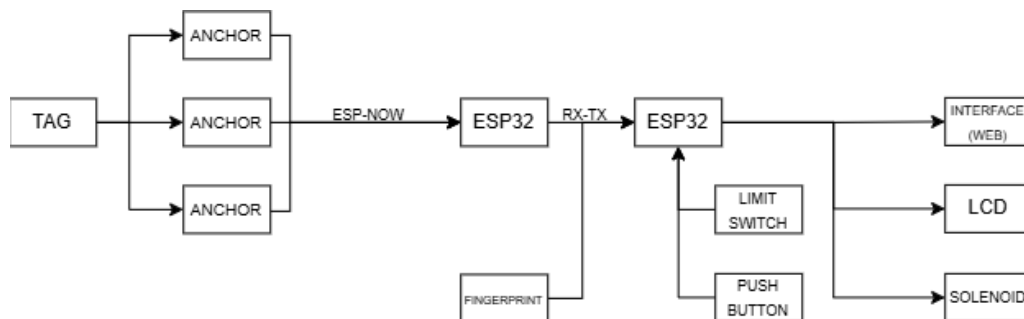
3.6 Perencanaan dan Desain Sistem

Tahap perencanaan dan desain merupakan tahap awal dalam pengembangan sistem yang bertujuan untuk merancang keseluruhan arsitektur sistem sebelum dilakukan implementasi. Pada tahap ini disusun konsep kerja sistem, perancangan perangkat keras, serta perancangan perangkat lunak agar sistem yang dikembangkan dapat berjalan sesuai dengan kebutuhan dan tujuan penelitian. Perancangan ini mencakup desain perangkat keras, pemilihan alat, perancangan rangkaian elektrik, penentuan posisi komponen, serta perancangan

antarmuka pengguna. Dengan adanya perencanaan yang matang, sistem yang dikembangkan diharapkan dapat bekerja sesuai dengan kebutuhan penelitian dan menghasilkan performa yang optimal.

3.6.1 Perancangan Sistem *Hardware*

Perancangan *hardware* sistem ditunjukkan melalui dua bentuk representasi, yaitu diagram blok konseptual pada Gambar 3.9 dan diagram realisasi perangkat pada Gambar 3.10. Keduanya digunakan untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai arsitektur sistem yang dikembangkan pada penelitian ini.

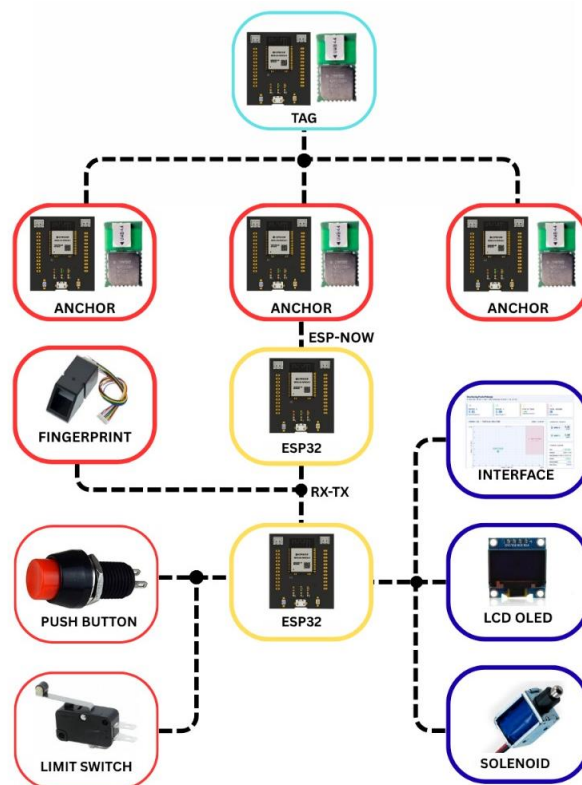


Gambar 3. 9 Diagram Blok Konseptual Sistem
(Data Pribadi, 2026)

Perancangan sistem hardware pada penelitian ini disusun berdasarkan diagram blok konseptual sistem yang menggambarkan hubungan antar komponen utama dalam sistem. Sistem terdiri dari satu *node* tag, tiga *node* anchor, mikrokontroler ESP32, sensor *fingerprint*, *limit switch*, *push button* serta perangkat keluaran berupa *interface* berbasis web, LCD, dan aktuator solenoid. Setiap komponen memiliki fungsi masing-masing dan saling terhubung untuk membentuk satu sistem yang terintegrasi.

Node tag berfungsi sebagai perangkat yang dibawa oleh pengguna dan bertugas mengirimkan sinyal UWB. Sinyal tersebut diterima oleh tiga *node* anchor yang posisinya telah ditentukan. Masing-masing anchor akan memproses sinyal dari tag untuk memperoleh data jarak, kemudian data tersebut dikirimkan secara nirkabel menggunakan protokol komunikasi ESP-NOW menuju mikrokontroler ESP32 sebagai unit pengumpul data. ESP32 pertama berperan sebagai pengolah awal data dan pengendali sistem autentikasi. Pada unit ini terhubung pula sensor *fingerprint* yang digunakan

untuk melakukan proses registrasi dan verifikasi pengguna. Hasil autentikasi menentukan apakah sistem akan memberikan akses atau tidak. Data dari ESP32 pertama kemudian dikirimkan ke ESP32 kedua melalui komunikasi RX-TX (serial). ESP32 kedua berfungsi sebagai unit pengelola keluaran sistem. Unit ini bertanggung jawab untuk meneruskan data ke *interface* berbasis web sebagai media monitoring, menampilkan informasi melalui LCD, serta mengendalikan solenoid *door lock* sebagai mekanisme pengunci pintu.



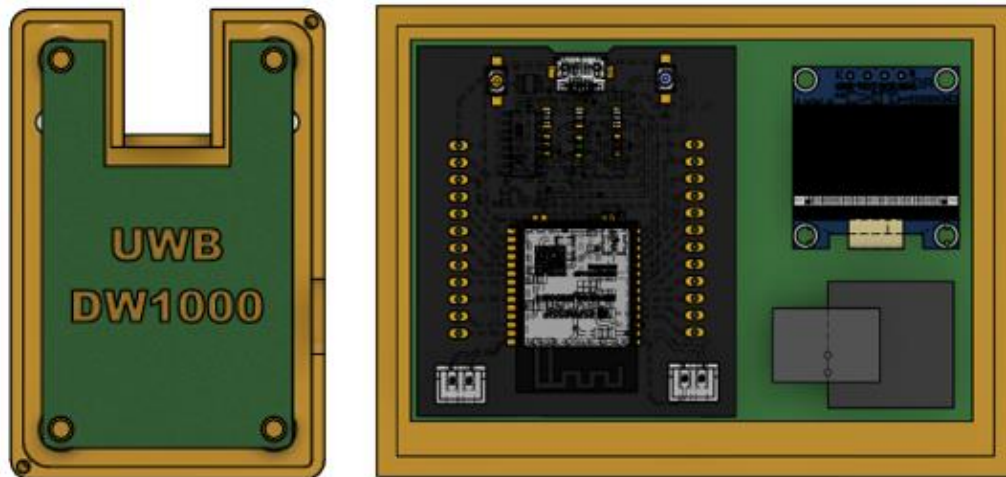
Gambar 3. 10 Diagram Realisasi Perangkat Keras Sistem
(Data Pribadi, 2026)

Gambar 3.10 merupakan penggambaran realisasi *hardware* dari sistem yang sama, dengan menampilkan bentuk modul perangkat yang digunakan secara fisik. Diagram ini bertujuan untuk memperjelas implementasi komponen nyata yang digunakan dalam perancangan. Dengan perancangan sistem *hardware* tersebut, sistem diharapkan mampu meningkatkan keamanan serta efektivitas pemantauan dan pengendalian akses pada lingkungan kerja.

3.6.2 Desain Alat

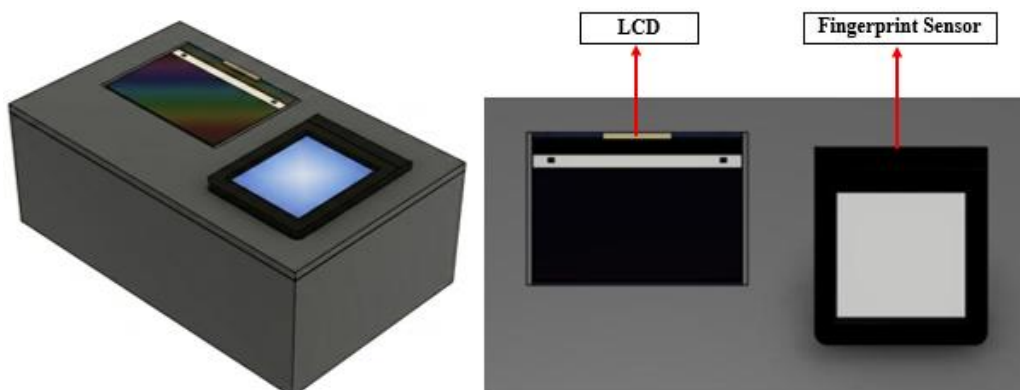
Pada gambar 3.11 merupakan desain alat yang akan digunakan, di mana

sistem dirancang dalam bentuk tertutup guna melindungi komponen elektrik yang berada di dalam box. Box tersebut dibuat menggunakan material hasil pencetakan 3D print, yang di dalamnya terdapat modul DWM1000, ESP, baterai, dan LCD sebagai bagian dari sistem perangkat.

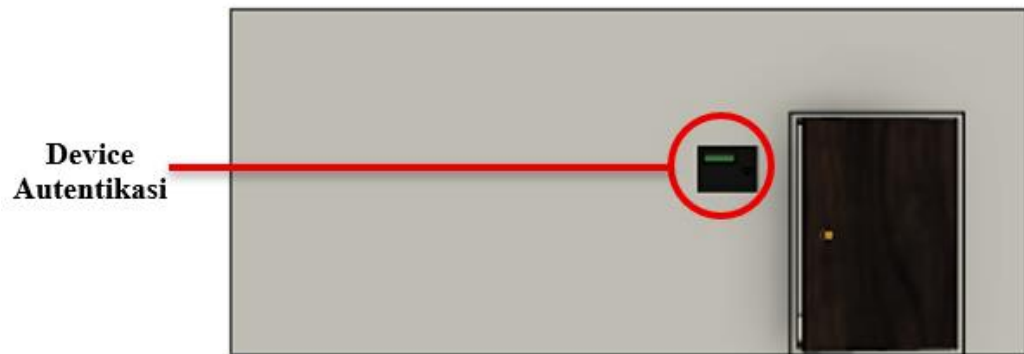


Gambar 3. 11 Desain *Node Tag* dan *Node Anchor*
(Data Pribadi, 2026)

Pada Gambar 3.12 dan Gambar 3.13 dibawah ini, menunjukkan rancangan perangkat autentikasi yang dipasang pada pintu. Perangkat ini berfungsi untuk mengaktifkan relay yang selanjutnya membuka kunci pintu sehingga pengguna dapat memasuki ruangan apabila akses berhasil diverifikasi sesuai dengan tag yang dimiliki. Desain alat autentikasi dilengkapi dengan sensor *fingerprint* as608 sebagai media autentikasi pengguna dan LCD sebagai media untuk menampilkan informasi proses autentikasi, seperti status pembacaan sidik jari hasil verifikasi pengguna.



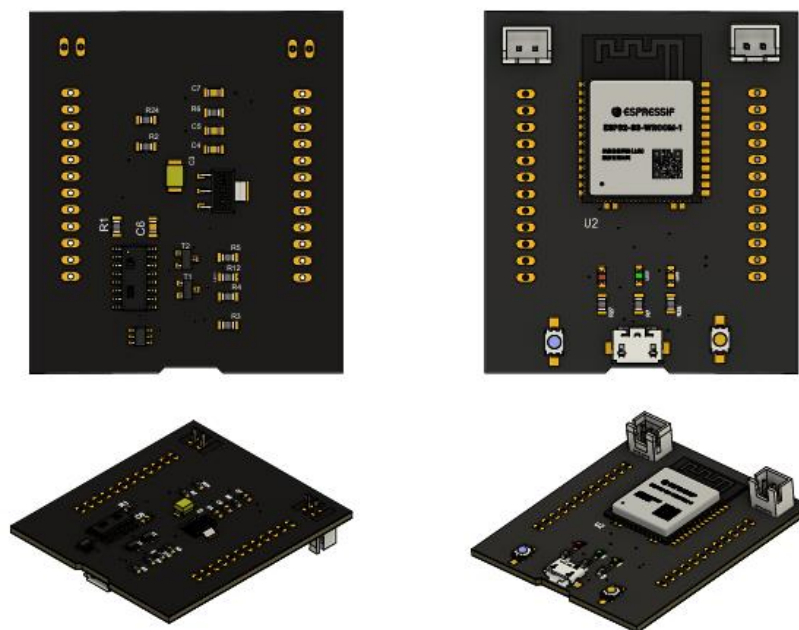
Gambar 3. 12 Desain Alat Autentikasi pada Pintu
(Data Pribadi, 2026)



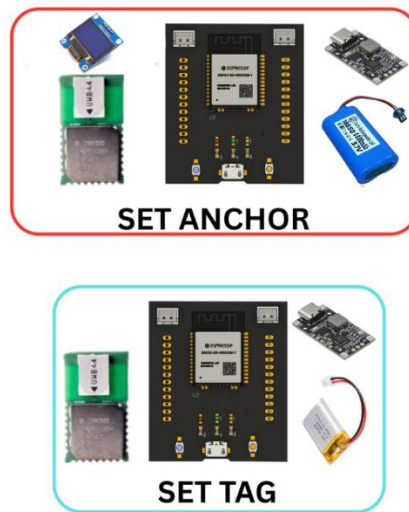
Gambar 3. 13 Pemasangan Alat Autentikasi pada Pintu
(Data Pribadi, 2026)

3.6.3 Perancangan Desain Elektrik

Sistem *Indoor Positioning System* (IPS) berbasis UWB yang dirancang pada penelitian ini tidak dapat terlepas dari perancangan sistem elektrik, khususnya pada konfigurasi perangkat keras yang digunakan pada minimum system, *node* anchor, dan *node* tag. Perancangan desain elektrik ini bertujuan untuk memastikan seluruh komponen dapat terhubung dan bekerja secara optimal sesuai dengan fungsi masing-masing. Gambar 3.14 menunjukkan desain minimum system yang digunakan serta pada Gambar 3.15 konfigurasi satu set anchor dan satu set tag yang digunakan dalam penelitian.



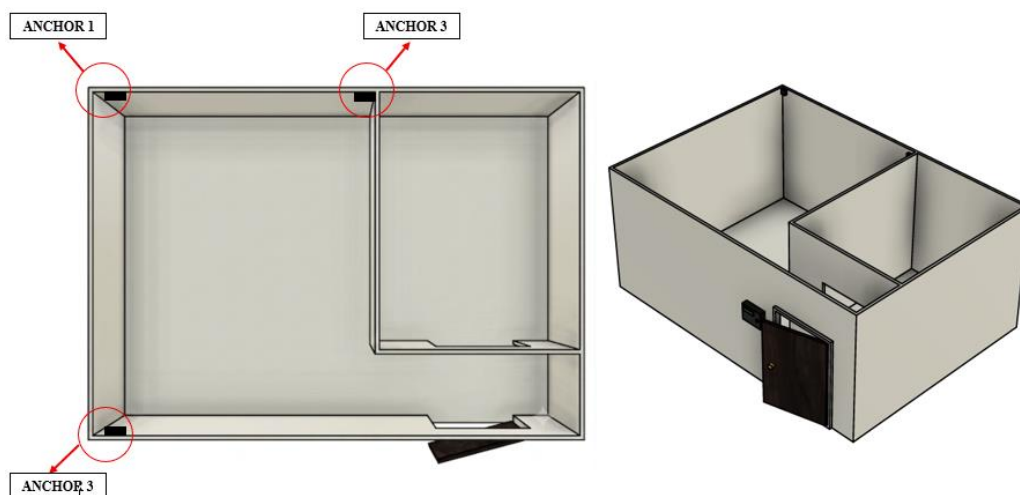
Gambar 3. 14 Desain Minimum System
(Data Pribadi, 2026)



Gambar 3. 15 1 Set *Node* Anchor & *Node* Tag
(Data Pribadi, 2026)

3.6.4 Ilustrasi Penempatan Posisi Anchor

Gambar 3. 16 memperlihatkan ilustrasi penempatan *node* anchor di dalam ruangan. *Node* anchor diposisikan pada sudut-sudut ruangan untuk mendukung proses pelokasian. Penempatan perangkat serta pelaksanaan penelitian ini dilakukan di Laboratorium Navigasi Gedung J.

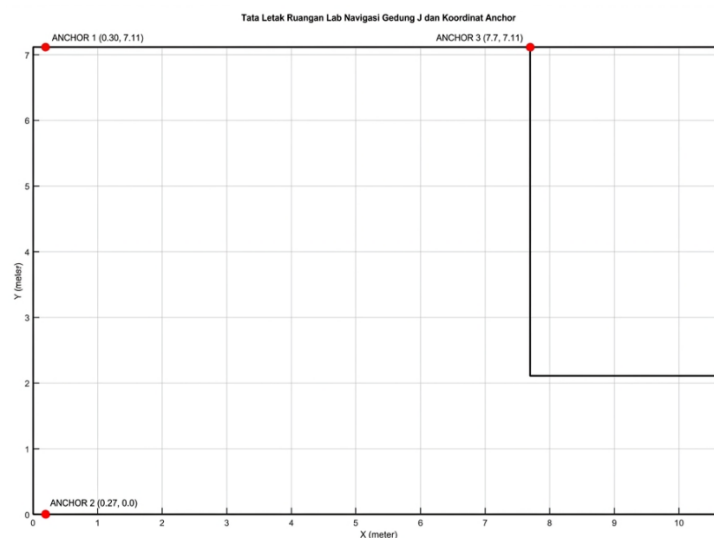


Gambar 3. 16 Lokasi Penelitian
(Data Pribadi, 2026)

Titik hitam yang ditandai dengan lingkaran merah pada Gambar 3.16 merepresentasikan posisi penempatan *node* anchor yang diletakkan pada sudut-sudut ruangan. Pada penelitian ini digunakan metode trilaterasi, sehingga jumlah anchor yang digunakan sebanyak tiga buah. Penelitian dilakukan pada ruangan Lab Navigasi Gedung J dengan ukuran panjang 10.7 m dan lebar 7.11

meter, serta terdapat sekat ruangan berukuran 5×3 meter.

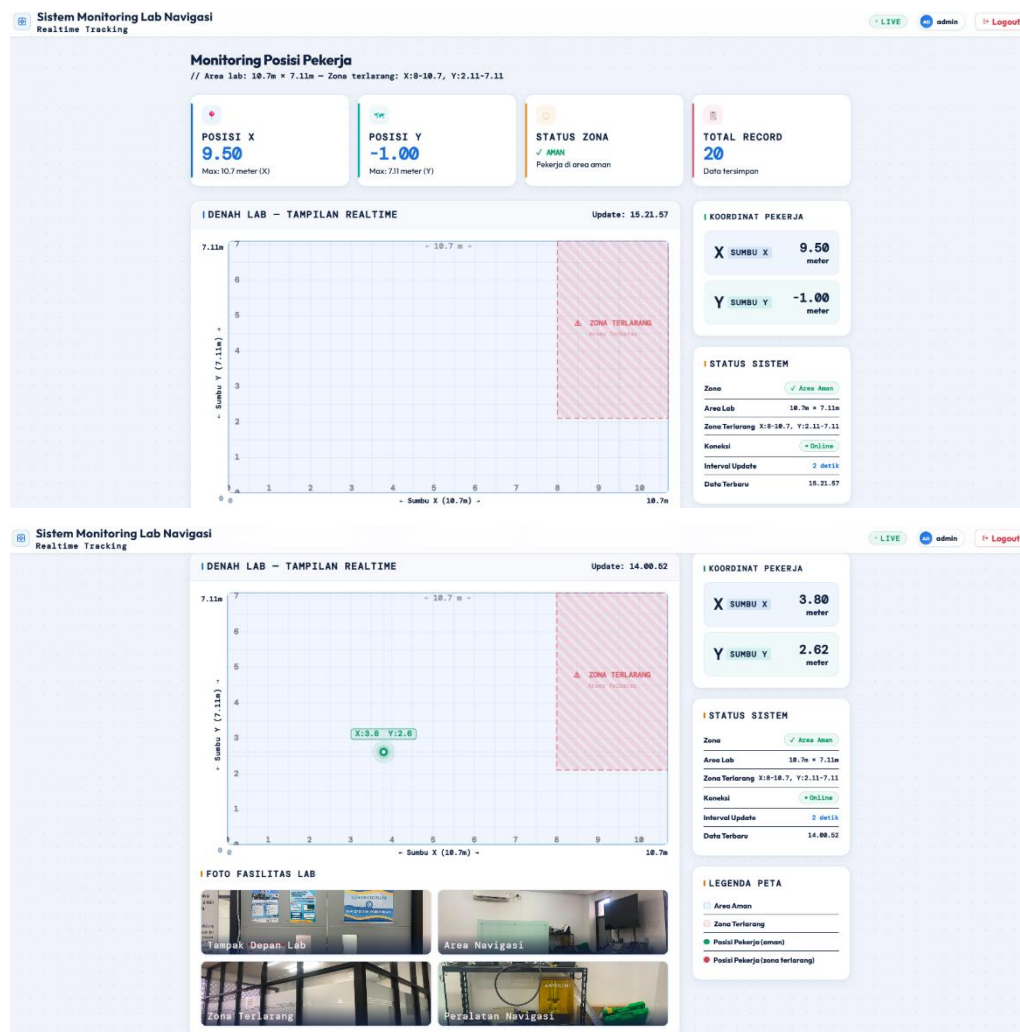
Penentuan koordinat *node* anchor dilakukan dengan menyesuaikan ukuran ruangan dan posisi sekat yang ada. Sistem koordinat yang digunakan adalah koordinat kartesius. Koordinat Kartesius merupakan sistem koordinat dua dimensi yang menggunakan sumbu x dan sumbu y yang saling tegak lurus untuk menentukan posisi suatu titik terhadap titik asal (0,0), di mana titik asal (0,0) ditetapkan pada sudut kiri bawah ruangan. Anchor 1 ditempatkan di sudut kiri atas ruangan dengan koordinat (0.30, 7.11). Anchor 2 diletakkan di sudut kiri bawah ruangan sebelum dengan koordinat (0.27, 0.00). Sementara itu, anchor 3 ditempatkan di bagian kanan atas sebelah sekat ruangan dengan koordinat (7.70, 7.11). Penempatan titik koordinat anchor di ilustrasikan pada Gambar 3. 17.



Gambar 3. 17 Tata Letak Ruang dan Posisi Koordinat Anchor
(Data Pribadi, 2026)

3.6.5 Perancangan dan Desain *Interface*

Tampilan *interface* pada Gambar 3.18 menunjukkan halaman utama sistem pemantauan yang berfungsi sebagai media visualisasi posisi pengguna secara *real-time*. *Interface* ini menampilkan area pemetaan ruangan, posisi tag dan anchor, serta informasi lain seperti status koneksi, status sistem area, koordinat anchor, dan data posisi yang dihasilkan oleh sistem.



Gambar 3. 18 Desain *Interface*
(Data Pribadi, 2026)

Dengan adanya tampilan *interface* ini, pengguna dapat memantau posisi secara lebih mudah dan jelas melalui visualisasi grafis. Desain yang sederhana dan informatif diharapkan mampu meningkatkan efektivitas pemantauan serta mendukung kinerja sistem secara keseluruhan.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tentang pengujian tugas akhir yang dilakukam oleh peneliti beserta analisisnya. Pengujian dilakukan dalam beberapa bagian seperti pengujian hardware, pengujian software, serta pengujian sistem. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh sistem yang terdapat pada tugas akhir ini mampu berjalan dengan baik sesuai dengan perencanaan sebelumnya.

4.1 Hasil Perakitan Rangkaian Elektrik

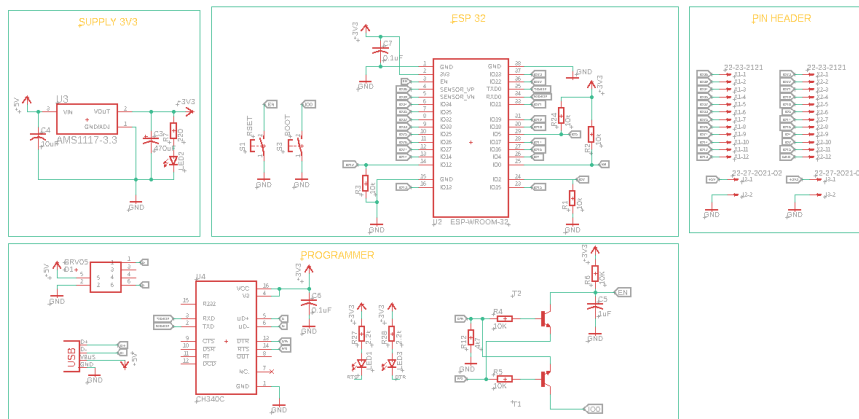
Pada subbab ini dijelaskan proses perancangan dan perakitan rangkaian elektrik yang digunakan dalam penelitian, meliputi rangkaian minimum sistem mikrokontroler serta rangkaian integrasi modul *Ultra-Wideband* (UWB) pada papan PCB. Perakitan rangkaian ini bertujuan untuk memastikan seluruh komponen dapat bekerja sesuai dengan fungsi yang dirancang sebelum dilakukan pengujian sistem secara keseluruhan. Selain itu, tahap ini juga menjadi dasar dalam menjamin kestabilan sistem pada saat proses pengambilan data dan pengujian performa.

4.1.1 Rangkaian Minimum Sistem ESP32

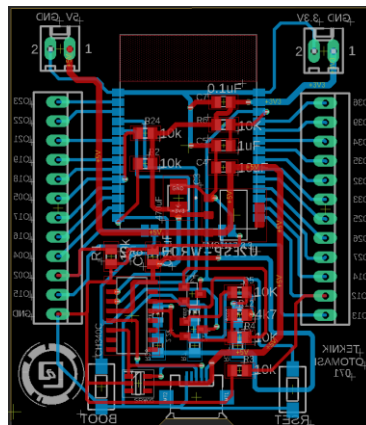
Rangkaian minimum sistem ESP32 merupakan rangkaian dasar yang digunakan agar mikrokontroler dapat beroperasi dengan baik. Rangkaian ini terdiri dari koneksi pin input/output yang digunakan untuk komunikasi dengan modul lain. Pada penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai pengolah utama data yang menerima hasil pembacaan jarak dari modul UWB, kemudian melakukan proses pengolahan data serta pengiriman ke sistem monitoring.

Selain itu, dilakukan pengujian awal pada rangkaian minimum sistem untuk memastikan ESP32 dapat berfungsi dengan baik, seperti proses *booting*, koneksi komunikasi serial, serta kemampuan dalam menjalankan program dasar.

Pada subbab ini ditampilkan dua hasil perancangan, yaitu Gambar 4. 1 skematik rangkaian dan board PCB sebagai bentuk visualisasi desain yang telah dibuat untuk tahap implementasi perangkat keras.



Gambar 4. 1 Desain Skematik ESP32
(Data Pribadi, 2026)



Gambar 4. 2 Desain Board ESP32
(Data Pribadi, 2026)

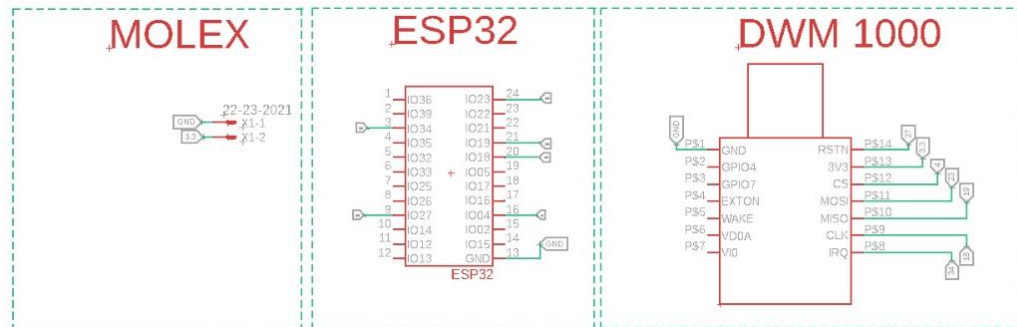


Gambar 4. 3 Hasil Cetak Board ESP32
(Data Pribadi, 2026)

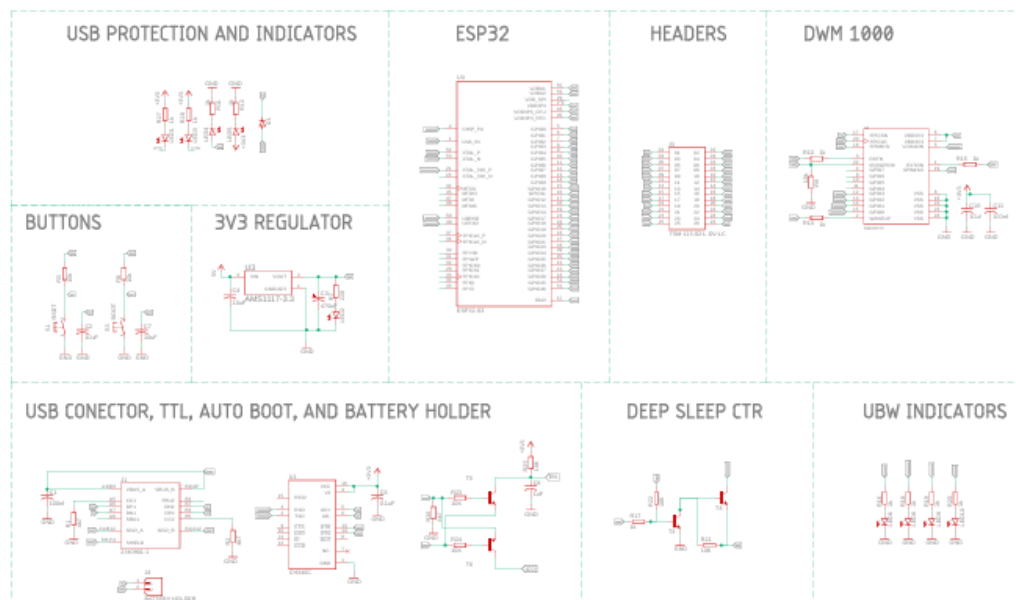
4.1.2 Rangkaian PCB Integrasi

Rangkaian PCB integrasi dirancang untuk menggabungkan modul ESP32 dengan modul UWB (DWM1000) serta komponen pendukung lainnya dalam satu papan rangkaian. Integrasi ini bertujuan untuk menghasilkan sistem

yang lebih ringkas, stabil, dan mudah dalam proses instalasi pada skenario pengujian. Hasil skematik PCB integrasi anchor ditunjukkan pada Gambar 4. 4 dan desain PCB integrasi tag pada Gambar 4. 5 dibawah ini.



Gambar 4. 4 Desain Skematik PCB Anchor
(Data Pribadi, 2026)



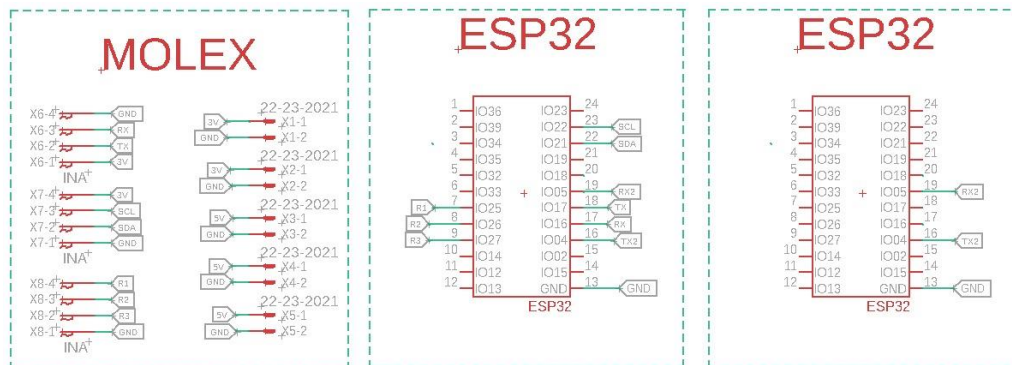
Gambar 4. 5 Desain Skematik PCB Tag

Hasil dari perakitan PCB ini kemudian diuji untuk memastikan bahwa komunikasi antara ESP32 dan modul UWB berjalan dengan baik, serta sistem dapat melakukan pembacaan jarak secara normal sebelum dilakukan pengujian lebih lanjut.

4.1.3 Rangkaian Sistem Autentikasi

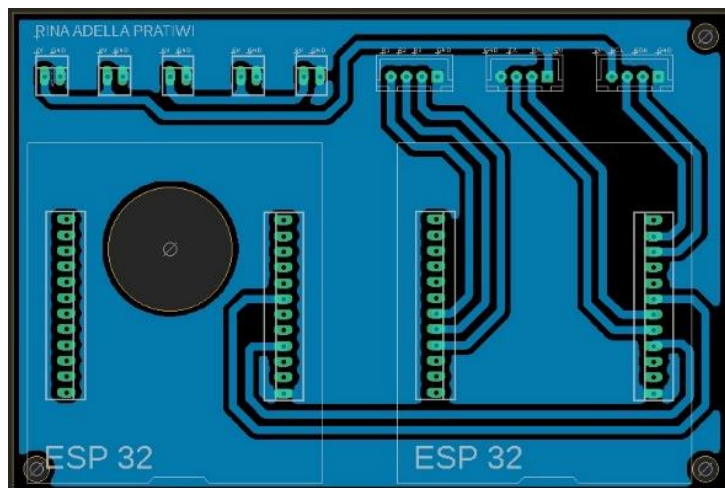
Rangkaian sistem autentikasi merupakan bagian dari sistem yang berfungsi untuk melakukan proses identifikasi pengguna sebelum diberikan hak akses memasuki ruangan. Sistem autentikasi pada penelitian ini

menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler utama yang terhubung dengan sensor *fingerprint*, relay, solenoid *door lock*, OLED *display*, serta konektor daya dan komunikasi.



Gambar 4. 6 Desain Skematik Sistem Autentikasi
(Data Pribadi, 2026)

Skematik rangkaian sistem autentikasi ditunjukkan pada Gambar 4. 6 diatas. Berdasarkan skematik yang telah dirancang, seluruh komponen kemudian direalisasikan dalam bentuk PCB agar pemasangan komponen menjadi lebih rapi, kuat, dan memudahkan proses integrasi dengan sistem *Indoor Positioning System* (IPS). Hasil perancangan PCB sistem autentikasi ditunjukkan pada Gambar 4. 7.



Gambar 4. 7 Hasil Perancangan PCB
(Data Pribadi, 2026)

Setelah proses pencetakan PCB selesai, dilakukan pemasangan seluruh komponen elektronik sesuai dengan desain skematik. Hasil perakitan menunjukkan bahwa setiap jalur pada PCB telah terhubung dengan baik sehingga seluruh komponen dapat berfungsi sesuai dengan perancangan.

4.2 Hasil Pengujian Komponen Sistem

Pada bagian ini membahas pengujian komponen sistem yang dilakukan untuk memastikan setiap bagian perangkat dapat berfungsi sesuai dengan perancangan sebelum diintegrasikan secara keseluruhan. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kinerja, keakuratan, *respons*, serta ketahanan dari masing-masing komponen utama yang digunakan dalam sistem. Dengan melakukan pengujian secara terpisah, setiap komponen dapat dievaluasi lebih mendalam sehingga potensi kesalahan atau ketidaksesuaian dapat diidentifikasi sejak awal

4.2.1 Pengujian Pengukuran Jarak Anchor dan Tag per Meter

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi pengukuran jarak antara anchor dan tag pada berbagai jarak tertentu. Pengujian dilakukan dengan variasi jarak, yaitu 1 meter sampai dengan 10 meter sesuai dengan kondisi ruangan. Pada setiap jarak, dilakukan pengambilan data sebanyak 10 kali untuk memperoleh nilai rata-rata *error* dan melihat distribusi nilai *error* yang dihasilkan. Hasil pengukuran dibandingkan dengan jarak sebenarnya untuk menghitung *error* menggunakan metode selisih absolut.



Gambar 4. 8 Pengujian Pengukuran Jarak
(Data Pribadi, 2026)

Tabel 4. 1 Pengukuran Anchor 1 ↔ Tag Untuk Jarak Pembacaan Sensor dengan Jarak Real tiap 1 meter

Jarak Real	Jarak Pembacaan Sensor									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1m	0.98	0.99	1.00	1.01	0.99	1.00	1.02	0.98	1.01	1.00
2m	1.96	2.09	2.02	2.03	2.01	2.04	2.02	2.05	2.03	2.01
3m	2.90	2.98	3.00	3.05	3.17	3.08	3.04	3.10	3.12	3.06
4m	3.97	4.00	4.03	4.05	4.02	4.07	4.14	4.10	4.12	4.06
5m	4.99	5.01	5.03	5.05	5.02	5.12	5.04	5.09	5.11	5.06

Jarak Real	Jarak Pembacaan Sensor									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
6m	5.79	5.95	6.00	6.02	5.98	6.05	6.01	6.07	6.10	6.03
7m	6.90	6.98	7.00	7.03	7.01	7.05	7.02	7.08	7.13	7.04
8m	7.90	7.95	7.97	7.98	7.96	7.99	7.97	8.00	8.01	7.98
9m	8.50	8.95	9.00	9.05	8.98	9.10	9.02	9.15	9.25	9.33
10m	9.69	9.90	9.90	9.95	9.88	9.98	9.92	10.00	10.01	9.94
11m	10.96	11.00	11.03	11.05	11.02	11.08	11.04	11.10	11.15	11.06
12m	11.91	11.93	11.94	11.95	11.94	11.96	11.95	11.97	11.96	11.97
13m	12.85	12.99	12.98	13.00	13.05	13.02	12.99	13.01	13.00	13.01

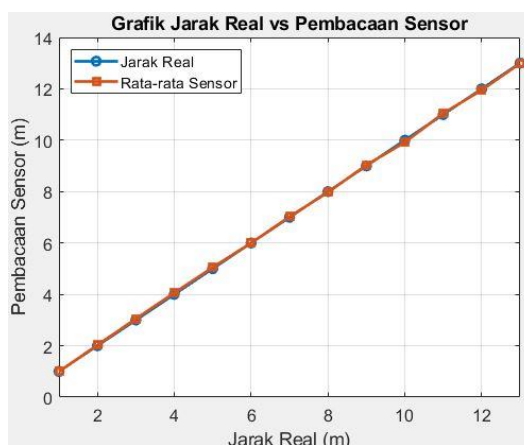
Berdasarkan Tabel 4.1, hasil pengukuran jarak antara Anchor 1 dan tag menunjukkan bahwa sistem UWB mampu mengukur jarak dengan cukup baik pada rentang pengujian 1–13 meter. Nilai hasil pembacaan cenderung mendekati jarak sebenarnya, meskipun masih terdapat selisih pengukuran pada beberapa titik. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh karakteristik propagasi sinyal UWB di lingkungan *indoor*, seperti pantulan sinyal (*multipath*), kondisi *Line of Sight* (LoS), serta toleransi pengukuran perangkat. Secara umum, hasil pengukuran menunjukkan kestabilan yang baik karena penyimpangan yang terjadi relatif kecil pada setiap pengambilan data.

Tabel 4. 2 MAE dan RMSE Per Meter Untuk Anchor 1 ↔ Tag

No	Jarak	Rata - rata	%Error	MAE (m)	RMSE (m)
1	1 meter	0.998	0.20%	0.010	0.012
2	2 meter	2.026	1.30%	0.032	0.041
3	3 meter	3.050	1.67%	0.052	0.062
4	4 meter	4.056	1.40%	0.060	0.067
5	5 meter	5.052	1.04%	0.052	0.058
6	6 meter	6.000	0.00%	0.036	0.041
7	7 meter	7.024	0.34%	0.032	0.037
8	8 meter	7.971	0.36%	0.033	0.038
9	9 meter	9.033	0.37%	0.045	0.050
10	10 meter	9.917	0.83%	0.089	0.095
11	11 meter	11.049	0.45%	0.057	0.064
12	12 meter	11.948	0.43%	0.060	0.067
13	13 meter	12.990	0.08%	0.018	0.022

Berdasarkan Tabel 4.2, hasil pengujian menunjukkan bahwa Anchor 1

menghasilkan nilai rata-rata pembacaan jarak sebesar 7,009 m terhadap rata-rata jarak sebenarnya, dengan persentase *error* sebesar 0,65%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa selisih antara hasil pengukuran dan jarak sebenarnya relatif kecil pada seluruh variasi jarak pengujian. Perbedaan pembacaan yang terjadi dipengaruhi oleh karakteristik propagasi sinyal UWB di lingkungan *indoor*, seperti pantulan sinyal (*multipath*) dan fluktuasi waktu tempuh sinyal selama proses pengukuran.



Gambar 4. 9 Grafik Pembacaan Jarak Anchor 1 ↔ Tag
(Data Pribadi, 2026)

Setelah dilakukan pengujian pada Anchor 1, pengujian yang sama kemudian diterapkan pada Anchor 2. Prosedur pengujian dilakukan dengan kondisi yang sama, yaitu variasi jarak 1–13 meter dan pengambilan data sebanyak 10 kali pada setiap jarak. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi pengukuran jarak yang dihasilkan oleh Anchor 2.

Tabel 4. 3 Pengukuran Anchor 2 ↔ Tag Untuk Jarak Pembacaan Sensor dengan Jarak Real tiap 1 meter

Jarak Real	Jarak Pembacaan Sensor									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1m	1.00	0.99	1.01	1.00	1.02	0.98	1.00	1.01	0.99	1.00
2m	2.01	2.03	2.00	2.02	2.04	2.01	2.05	2.00	2.02	2.03
3m	3.01	3.03	3.05	3.02	3.06	3.04	3.00	3.02	3.03	3.04
4m	4.02	4.05	4.03	4.06	4.04	4.02	4.07	4.01	4.05	4.03
5m	5.03	5.05	5.02	5.04	5.01	5.06	5.07	5.03	5.04	5.02
6m	6.02	6.00	5.99	6.03	6.01	6.04	6.02	5.98	6.01	6.00
7m	7.01	7.03	7.02	7.05	7.04	7.01	7.00	7.03	7.02	7.04

Jarak Real	Jarak Pembacaan Sensor									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
8m	8.02	8.01	7.99	8.03	8.00	7.98	8.04	8.02	7.99	8.01
9m	9.03	9.01	9.05	9.02	9.00	9.04	9.03	9.01	9.02	9.04
10m	9.98	10.01	10.03	9.99	10.02	10.00	9.97	10.01	10.02	9.99
11m	11.02	11.00	11.03	11.04	11.01	11.05	11.02	11.00	11.03	11.01
12m	12.01	11.99	12.03	12.02	12.00	12.04	12.01	11.98	12.03	12.02
13m	13.01	12.99	13.03	13.00	13.02	12.98	13.01	13.02	12.99	13.00

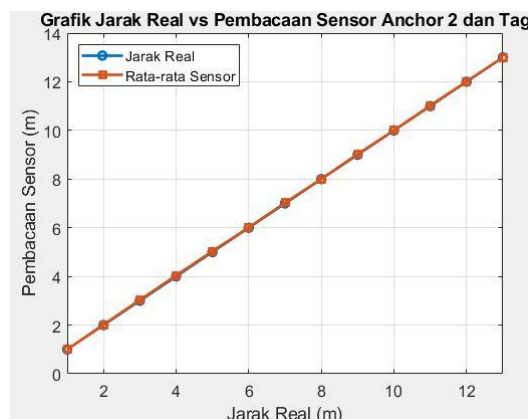
Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.3, Anchor 2 juga menunjukkan kemampuan dalam mengukur jarak terhadap tag dengan hasil yang mendekati jarak sebenarnya. Meskipun terdapat sedikit variasi pada beberapa titik pengujian, pola pengukuran secara keseluruhan masih konsisten. Variasi tersebut dapat disebabkan oleh kondisi lingkungan pengujian, seperti adanya objek di sekitar lintasan propagasi sinyal maupun pengaruh *multipath* yang menyebabkan waktu tempuh sinyal sedikit berubah.

Tabel 4. 4 MAE dan RMSE Per Meter Untuk Anchor 2 ↔ Tag

No	Jarak	Rata - rata	%Error	MAE (m)	RMSE (m)
1	1 meter	1.000	0.00%	0.008	0.010
2	2 meter	2.021	1.05%	0.021	0.026
3	3 meter	3.030	1.00%	0.030	0.036
4	4 meter	4.038	0.95%	0.038	0.044
5	5 meter	5.037	0.74%	0.037	0.042
6	6 meter	6.010	0.17%	0.022	0.027
7	7 meter	7.025	0.36%	0.025	0.031
8	8 meter	8.009	0.11%	0.021	0.025
9	9 meter	9.025	0.28%	0.025	0.030
10	10 meter	10.002	0.02%	0.018	0.022
11	11 meter	11.021	0.19%	0.021	0.026
12	12 meter	12.013	0.11%	0.023	0.028
13	13 meter	13.005	0.04%	0.017	0.021

Berdasarkan Tabel 4.4, Anchor 2 memperoleh nilai rata-rata pembacaan jarak sebesar 7,018 m dengan persentase *error* sebesar 0,39%. Nilai persentase *error* tersebut merupakan yang paling kecil dibandingkan anchor lainnya, sehingga hasil pengukuran Anchor 2 memiliki penyimpangan paling rendah

terhadap jarak sebenarnya. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi propagasi sinyal pada posisi Anchor 2 selama pengujian relatif lebih stabil sehingga menghasilkan estimasi jarak yang lebih mendekati nilai referensi.



Gambar 4. 10 Grafik Pembacaan Jarak Anchor 2 ↔ Tag
(Data Pribadi, 2026)

Selanjutnya, pengujian dilakukan pada Anchor 3 menggunakan prosedur yang sama seperti pengujian sebelumnya. Pengukuran dilakukan pada variasi jarak 1–13 meter dengan 10 kali pengambilan data pada setiap titik pengujian. Hasil pengukuran kemudian dianalisis untuk mengetahui tingkat akurasi Anchor 3 melalui perhitungan nilai *error*, MAE, dan RMSE, sehingga dapat dibandingkan dengan hasil yang diperoleh pada Anchor 1 dan Anchor 2.

Tabel 4. 5 Pengukuran Anchor 3 ↔ Tag Untuk Jarak Pembacaan Sensor dengan Jarak Real tiap 1 meter

Jarak Real	Jarak Pembacaan Sensor									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1m	1.01	0.99	1.00	1.02	1.01	0.98	1.00	1.01	0.99	1.02
2m	2.02	2.01	2.04	2.03	2.00	2.05	2.01	2.03	2.02	2.04
3m	3.04	3.02	3.05	3.01	3.06	3.03	3.04	3.02	3.05	3.03
4m	4.03	4.05	4.02	4.06	4.04	4.07	4.01	4.03	4.05	4.04
5m	5.04	5.03	5.06	5.05	5.02	5.07	5.01	5.04	5.03	5.05
6m	6.03	6.01	6.05	6.02	6.00	6.04	6.01	6.03	6.02	6.05
7m	7.02	7.04	7.03	7.01	7.05	7.02	7.04	7.03	7.01	7.05
8m	8.03	8.01	8.04	8.02	8.00	8.05	8.01	8.03	8.02	8.04
9m	9.04	9.02	9.05	9.03	9.01	9.06	9.02	9.04	9.03	9.05
10m	10.03	10.01	10.05	10.02	10.00	10.04	10.01	10.03	10.02	10.05
11m	11.04	11.02	11.05	11.03	11.01	11.06	11.02	11.04	11.03	11.05

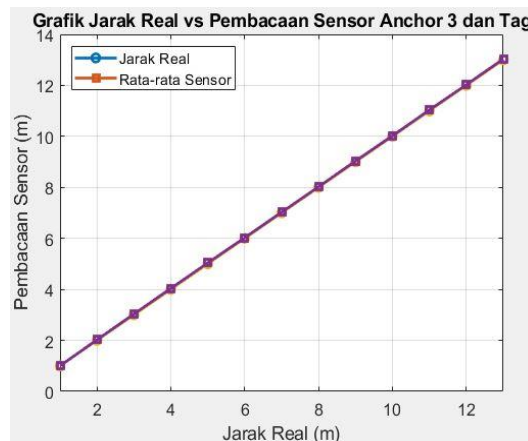
Jarak Real	Jarak Pembacaan Sensor									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
12m	12.03	12.01	12.05	12.02	12.00	12.04	12.01	12.03	12.02	12.05
13m	13.04	13.02	13.05	13.03	13.01	13.06	13.02	13.04	13.03	13.05

Hasil pengukuran pada Tabel 4.5 menunjukkan bahwa Anchor 3 mampu melakukan pembacaan jarak terhadap tag dengan hasil yang relatif mendekati nilai sebenarnya. Beberapa data menunjukkan adanya penyimpangan kecil yang masih berada dalam batas toleransi sistem. Penyimpangan tersebut dipengaruhi oleh kondisi propagasi sinyal UWB di lingkungan *indoor* yang dapat menyebabkan fluktuasi hasil pengukuran.

Tabel 4. 6 Perhitungan MAE dan RMSE Per Meter Untuk Anchor 3 ↔ Tag

No	Jarak	Rata - rata	%Error	MAE (m)	RMSE (m)
1	1 meter	1.003	0.30%	0.010	0.012
2	2 meter	2.025	1.25%	0.025	0.030
3	3 meter	3.035	1.17%	0.035	0.041
4	4 meter	4.040	1.00%	0.040	0.046
5	5 meter	5.040	0.80%	0.040	0.045
6	6 meter	6.026	0.43%	0.026	0.031
7	7 meter	7.030	0.43%	0.030	0.035
8	8 meter	8.025	0.31%	0.025	0.030
9	9 meter	9.035	0.39%	0.035	0.040
10	10 meter	10.026	0.26%	0.026	0.031
11	11 meter	11.035	0.32%	0.035	0.040
12	12 meter	12.026	0.22%	0.026	0.031
13	13 meter	13.035	0.27%	0.035	0.041

Berdasarkan Tabel 4.6, hasil pengujian menunjukkan bahwa Anchor 3 menghasilkan nilai rata-rata pembacaan jarak sebesar 7,029 m dengan persentase *error* sebesar 0,55%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hasil pengukuran masih memiliki penyimpangan yang kecil terhadap jarak sebenarnya. Variasi *error* yang muncul pada beberapa titik pengujian dapat disebabkan oleh pengaruh kondisi lingkungan *indoor*, seperti efek *multipath* akibat pantulan sinyal pada dinding maupun objek di sekitar area pengujian, yang memengaruhi waktu tempuh sinyal UWB.



Gambar 4. 11 Grafik Pembacaan Jarak Anchor 3 ↔ Tag
(Data Pribadi, 2026)

Berdasarkan hasil pengujian pengukuran jarak antara anchor dan tag pada setiap interval 1 meter, terlihat bahwa sistem mampu memberikan hasil pembacaan yang cukup akurat. Peningkatan *error* kemungkinan disebabkan oleh faktor lingkungan seperti *multipath* dan *noise* sinyal. Meskipun demikian, secara keseluruhan sistem masih menunjukkan performa yang baik karena sebagian besar hasil pengukuran berada di sekitar nilai sebenarnya.

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui karakteristik akurasi sistem UWB terhadap perubahan jarak serta kestabilan hasil pengukuran pada setiap titik pengujian. Berdasarkan hasil pengujian, nilai MAE digunakan untuk mengetahui rata-rata *error* absolut sistem, sedangkan RMSE digunakan untuk melihat sensitivitas sistem terhadap *error* yang besar. Selain itu, persentase *error* digunakan untuk membandingkan tingkat kesalahan terhadap jarak sebenarnya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang baik dengan nilai *error* rata-rata di bawah 10 cm.

4.2.2 Pengujian Ketahanan Baterai

Pengujian ketahanan baterai dan sistem charging dilakukan untuk mengetahui performa baterai Li-Ion 18650 dengan tegangan nominal 7,4 V dalam menyuplai daya pada *node* tag selama proses operasional. Selain itu, pengujian ini juga bertujuan untuk mengetahui kestabilan tegangan baterai serta durasi waktu penggunaan dengan cara menghidupkan *node* yang telah diberi baterai kemudian menghitung tegangannya setiap 15 menit sekali. Pada

penelitian ini, baterai yang digunakan adalah baterai Li-Ion 18650 yang disusun secara seri sehingga menghasilkan tegangan 7,4 V. Tegangan tersebut kemudian diturunkan menggunakan modul step down untuk memenuhi kebutuhan tegangan kerja ESP32 dan modul UWB.



Gambar 4. 12 Pengujian Ketahanan Baterai
(Data Pribadi, 2026)

Hasil pengujian ketahanan baterai ditunjukkan dalam bentuk Tabel 4.7 yang berisi data perubahan tegangan terhadap waktu selama sistem beroperasi. Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik penurunan tegangan baterai selama digunakan untuk menyuplai daya *node* tag.

Tabel 4. 7 Hasil pengujian ketahanan baterai saat *node* melakukan transmit data

No	Waktu	Tegangan (Vdc)	Proses Transmisi
1	10.05	7,80	✓
2	10.20	7,75	✓
3	10.35	7,72	✓
4	10.50	7,71	✓
5	11.05	7,70	✓
6	11.20	7,70	✓
7	11.25	7,69	✓
8	11.50	7,66	✓
9	12.05	7,65	✓
10	12.20	7,62	✓

Berdasarkan Tabel 4.7, hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan baterai mengalami penurunan secara bertahap selama *node* tag beroperasi. Tegangan awal baterai tercatat sebesar 7,80 V, kemudian menurun menjadi 7,75 V pada pengukuran berikutnya dan terus mengalami penurunan secara perlahan hingga mencapai 7,62 V pada akhir pengujian. Selama periode pengujian yang

berlangsung sekitar 2 jam 15 menit, *node* tag tetap mampu melakukan proses transmisi data pada setiap interval pengukuran, yang ditunjukkan dengan status proses transmisi berhasil pada seluruh pengujian.

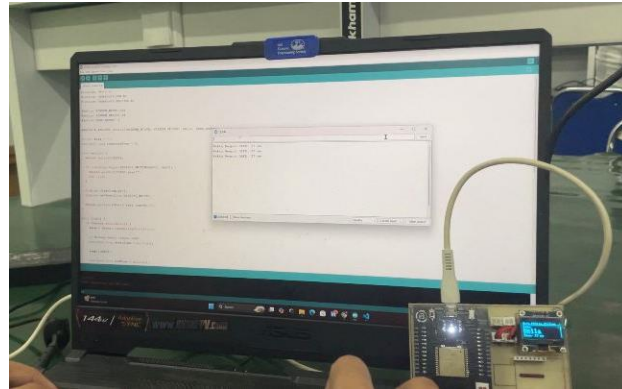
Berdasarkan hasil tersebut, total penurunan tegangan baterai dari awal hingga akhir pengujian adalah sebesar 0,18 V. Penurunan tegangan yang relatif kecil menunjukkan bahwa baterai Li-Ion 18650 yang disusun secara seri mampu menyuplai daya secara stabil selama sistem beroperasi.

4.2.3 Pengujian OLED Display

Pengujian OLED Display 0.96 inch dilakukan untuk mengevaluasi kinerja layar sebagai media output informasi pada sistem. OLED berperan dalam menampilkan data atau status tertentu kepada pengguna, sehingga diperlukan pengujian untuk memastikan bahwa informasi dapat ditampilkan dengan baik, akurat, dan dalam waktu yang cepat.

Pada penelitian ini, pengujian OLED Display difokuskan pada keberhasilan menampilkan data dan waktu respon tampilan. Pengujian keberhasilan menampilkan data bertujuan untuk mengetahui apakah layar mampu menampilkan pesan atau informasi sesuai perintah sistem tanpa adanya kesalahan tampilan. Sementara itu, pengujian waktu respon bertujuan untuk mengukur kecepatan OLED dalam menampilkan data sejak perintah diberikan hingga informasi muncul pada layar.

Pada pengujian keberhasilan menampilkan data, sistem akan mengirimkan pesan tertentu ke OLED, kemudian diamati apakah pesan tersebut muncul dengan benar. Hasil pengujian dicatat dalam kategori berhasil atau gagal. Sedangkan pada pengujian waktu respon, pengukuran dilakukan menggunakan fungsi internal mikrokontroler, yaitu `millis()`, untuk menghitung selisih waktu antara saat perintah tampilan dikirim hingga data berhasil ditampilkan pada OLED. Hasil pengukuran dinyatakan dalam satuan milidetik (ms).



Gambar 4. 13 Pengujian OLED Display
(Data Pribadi, 2026)

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Keberhasilan Menampilkan Data OLED Display

Pengujian ke-	Pesan yang Dikirim	Status	Waktu Respon (ms)
1	della	✓	27 ms
2	della	✓	27 ms
3	della	✓	27 ms
4	della	✓	27 ms
5	della	✓	27 ms
6	della	✓	27 ms
7	della	✓	27 ms
8	della	✓	27 ms
9	della	✓	27 ms
10	della	✓	27 ms

Tabel 4. 8 berikut menunjukkan hasil pengujian OLED Display 0.96 inch dalam menampilkan data pada sistem. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali percobaan untuk mengetahui tingkat keberhasilan layar dalam menampilkan pesan sesuai perintah yang diberikan.

4.2.4 Pengujian *Fingerprint* Sensor

Pengujian *fingerprint* sensor dilakukan untuk mengetahui tingkat keberhasilan serta kestabilan kinerja sensor dalam menjalankan fungsi autentikasi sidik jari pada sistem. Sensor yang digunakan pada penelitian ini berperan sebagai komponen utama dalam proses identifikasi pengguna, sehingga diperlukan pengujian secara menyeluruh untuk memastikan bahwa sensor mampu bekerja sesuai dengan kebutuhan sistem. Pengujian pada *fingerprint* sensor dibagi menjadi dua tahap, yaitu pengujian proses pendaftaran sidik jari (*enrollment*) dan pengujian proses verifikasi sidik jari (*verification*).

Sebelum dilakukan pengujian terhadap *fingerprint* sensor, terlebih

dahulu dilakukan konfigurasi koneksi antara mikrokontroler ESP32 dengan sensor *fingerprint* AS608. Koneksi ini bertujuan untuk memastikan komunikasi data antara kedua perangkat dapat berjalan dengan baik. Sensor *fingerprint* AS608 berkomunikasi dengan ESP32 menggunakan komunikasi serial (UART), sehingga diperlukan pengaturan pin *transmit* (TX) dan *receive* (RX) yang sesuai.

Tabel 4. 9 Koneksi ESP32 dengan *Fingerprint* Sensor AS608

Pin ESP32	Pin Sensor AS608
3.3V	VCC
GND	GND
RX (GPIO 16)	TX
TX (GPIO 17)	RX



Gambar 4. 14 Pengujian *Fingerprint* Sensor
(Data Pribadi, 2026)

4.2.4.1 Pengujian Proses Pendaftaran Sidik Jari (*Enrollment*)

Pengujian proses pendaftaran sidik jari dilakukan untuk mengetahui kinerja sensor *fingerprint* dalam menyimpan data sidik jari pengguna ke dalam sistem. Proses pendaftaran ini merupakan tahap awal yang penting, karena kualitas data sidik jari yang tersimpan akan mempengaruhi keberhasilan proses verifikasi pada tahap selanjutnya. Pada penelitian ini, pengujian dilakukan sebanyak 10 kali percobaan pendaftaran sidik jari. Setiap percobaan diamati apakah proses pendaftaran berhasil atau gagal.

Pada proses pendaftaran sidik jari, setiap data sidik jari yang berhasil direkam akan disimpan dengan identitas (ID) tertentu yang ditentukan oleh pengguna atau sistem. Pemberian ID ini bertujuan untuk membedakan setiap pengguna yang terdaftar dalam sistem serta mempermudah proses identifikasi pada tahap verifikasi.

Dalam penelitian ini, ID sidik jari diberikan secara berurutan sesuai dengan jumlah pengguna yang terdaftar, misalnya ID 1, ID 2, dan seterusnya. Setiap ID yang tersimpan akan dikaitkan dengan data pengguna tertentu sehingga sistem dapat mengenali identitas pengguna saat proses verifikasi berlangsung. Dengan adanya mekanisme ini, sistem autentikasi dapat berjalan secara lebih terstruktur dan terorganisir. Berikut ini merupakan tabel hasil pengujian pendaftaran sidik jari yang telah dilakukan.

Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Pendaftaran Sidik Jari

ID	Status	Tampilan Serial Monitor
#1	Berhasil tersimpan	<pre>[MODE] LIST - Daftar Template Tersimpan Total template tersimpan: 10 / 64 ID yang tersimpan: → ID #1 → ID #2 → ID #3 → ID #4 → ID #5 → ID #6 → ID #7 → ID #8 → ID #9 → ID #10</pre>
#2	Berhasil tersimpan	
#3	Berhasil tersimpan	
#4	Berhasil tersimpan	
#5	Berhasil tersimpan	
#6	Berhasil tersimpan	
#7	Berhasil tersimpan	
#8	Berhasil tersimpan	
#9	Berhasil tersimpan	
#10	Berhasil tersimpan	

Dari hasil pengujian yang dilakukan, sistem menunjukkan tingkat keberhasilan yang tinggi dalam proses pendaftaran sidik jari, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor *fingerprint* yang digunakan mampu menyimpan data sidik jari dengan baik dan siap digunakan pada tahap verifikasi.

4.2.4.2 Pengujian Proses Verifikasi Sidik Jari (Enrollment)

Pengujian proses verifikasi sidik jari dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengenali sidik jari yang telah terdaftar sebelumnya. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat keberhasilan sistem dalam melakukan autentikasi pengguna.

Pada penelitian ini, pengujian dilakukan sebanyak 10 kali percobaan verifikasi sidik jari menggunakan data sidik jari yang telah didaftarkan sebelumnya. Setiap percobaan diamati apakah sistem berhasil mengenali sidik jari atau tidak, serta waktu respons yang dibutuhkan. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 4. 11.

Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Proses Verifikasi Sidik Jari

Percobaan ke-	ID	Status	Respon
1	#1	Berhasil	429ms
2	#2	Berhasil	340ms
3	#3	Berhasil	420ms
4	#4	Berhasil	476ms
5	#5	Berhasil	382ms
6	#6	Berhasil	463ms
7	#7	Berhasil	391ms
8	#8	Berhasil	416ms
9	#9	Berhasil	341ms
10	#10	Berhasil	329ms

```
[MODE] VIEW LOG - Riwayat Pembacaan

+-----+-----+-----+-----+
| No  | ID  | Status  | Respon  |
+-----+-----+-----+-----+
| 1   | # 1 | BERHASIL | 429 ms |
| 2   | # 2 | BERHASIL | 340 ms |
| 3   | # 3 | BERHASIL | 420 ms |
| 4   | # 4 | BERHASIL | 476 ms |
| 5   | # 5 | BERHASIL | 382 ms |
| 6   | # 6 | BERHASIL | 463 ms |
| 7   | # 7 | BERHASIL | 391 ms |
| 8   | # 8 | BERHASIL | 416 ms |
| 9   | # 9 | BERHASIL | 341 ms |
| 10  | #10 | BERHASIL | 329 ms |
+-----+-----+-----+-----+

Total scan      : 10 kali
Berhasil        : 10 kali
Gagal           : 0 kali
Respon rata2    : 398 ms
Respon tercepat : 329 ms
Respon terlambat: 476 ms
```

Gambar 4. 15 Tampilan Serial Monitor Pengujian Verifikasi Sidik Jari
(Data Pribadi, 2026)

Setelah proses pendaftaran sidik jari berhasil dilakukan, tahap selanjutnya adalah pengujian proses verifikasi. Pengujian dilakukan menggunakan 2 ID sidik jari yang telah tersimpan, dengan masing-masing ID

diuji sebanyak 10 kali percobaan. Hasil pengujian verifikasi sidik jari ditunjukkan pada Tabel 4. 12.

Tabel 4. 12 Pengujian Proses Verifikasi dengan 2 ID Sidik Jari

ID	Status	ID	Status
#1	Berhasil	#2	Berhasil
#1	Berhasil	#2	Berhasil
#1	Berhasil	#2	Berhasil
#1	Berhasil	#2	Berhasil
#1	Berhasil	#2	Berhasil
#1	Berhasil	#2	Berhasil
#1	Berhasil	#2	Berhasil
#1	Berhasil	#2	Berhasil
#1	Berhasil	#2	Berhasil
#1	Berhasil	#2	Berhasil

Berdasarkan hasil pengujian proses verifikasi sidik jari telah dilakukan sebanyak 10 kali percobaan dengan 10 ID atau 10 sidik jari yang berbeda diperoleh tingkat keberhasilan sebesar 100%, dengan jumlah percobaan berhasil sebanyak 10 kali dan tidak terdapat kegagalan dalam proses verifikasi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem autentikasi *fingerprint* yang digunakan memiliki tingkat keandalan yang sangat baik dalam mengenali sidik jari yang telah terdaftar.

Variasi waktu respons yang terjadi pada setiap percobaan kemungkinan dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti posisi dan tekanan jari pada sensor, kondisi permukaan sensor, serta proses internal pencocokan data pada memori sensor *fingerprint*. Meskipun demikian, perbedaan waktu respons tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dan masih berada dalam rentang yang stabil.

4.2.5 Pengujian Solenoid *Door lock*

Pengujian solenoid *door lock* dilakukan untuk mengetahui kinerja aktuator dalam membuka dan mengunci mekanisme pintu berdasarkan sinyal kendali dari mikrokontroler ESP32. Pada pengujian ini, solenoid *door lock* diuji secara mandiri tanpa integrasi dengan sistem autentikasi *fingerprint*.

Solenoid *door lock* dikendalikan oleh ESP32 melalui modul relay yang

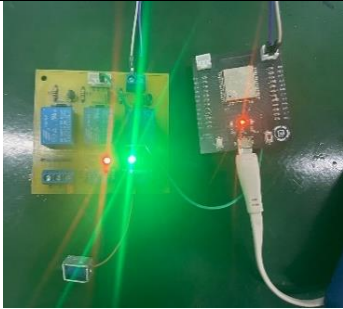
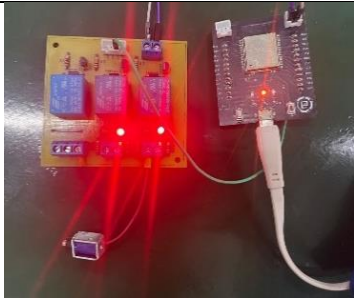
berfungsi sebagai saklar elektronik untuk menghubungkan dan memutus arus ke solenoid. Pengujian dilakukan dengan memberikan perintah logika ON dan OFF dari mikrokontroler untuk mengamati respons solenoid dalam kondisi terbuka dan tertutup.



Gambar 4. 16 Modul Relay
(Data Pribadi, 2026)

Hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel dibawah ini untuk menunjukkan keberhasilan sistem dalam mengontrol solenoid berdasarkan input yang diberikan. Dengan demikian, pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa aktuator solenoid dapat berfungsi dengan baik sebelum diintegrasikan dengan sistem autentikasi dan monitoring secara keseluruhan.

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian *Solenoid Door lock*

Dokumentasi Pengujian	Relay	Solenoid
	ON	Tertutup
	OFF	Terbuka

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4. 13, solenoid *door lock* memberikan respons yang sesuai terhadap kondisi relay yang dikendalikan oleh ESP32. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komunikasi antara ESP32, modul relay, dan solenoid *door lock* berlangsung dengan baik tanpa ditemukan kegagalan aktuasi selama pengujian. Dengan demikian, solenoid *door lock* telah berfungsi sesuai dengan perintah yang diberikan oleh mikrokontroler dan siap untuk diintegrasikan dengan sistem autentikasi *fingerprint*, sehingga mekanisme buka dan kunci pintu dapat bekerja secara otomatis berdasarkan hasil proses verifikasi pengguna.

4.3 Pengujian Sistem Autentikasi *Fingerprint*

Pengujian sistem autentikasi *fingerprint* dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sensor sidik jari dalam mengidentifikasi pengguna serta memastikan integrasi antara sensor *fingerprint*, mikrokontroler ESP32, database, dan aktuator solenoid *door lock* telah berfungsi sesuai dengan rancangan sistem. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat keberhasilan proses autentikasi serta kemampuan sistem dalam memberikan hak akses masuk ruangan hanya kepada pengguna yang telah terdaftar. Tahapan pengujian meliputi pengujian pembacaan sidik jari, pengujian integrasi *fingerprint* dengan sistem, dan pengujian akses masuk ruangan.

4.3.1 Pengujian Pembacaan Sidik Jari dan Integrasi Sistem

Pengujian pembacaan sidik jari dan integrasi sistem dilakukan untuk memastikan sensor *fingerprint* mampu mengenali sidik jari yang telah didaftarkan (*enrollment*) serta memverifikasi bahwa proses autentikasi dapat terintegrasi dengan sistem monitoring berbasis *Indoor Positioning System* (IPS). Pada pengujian ini digunakan satu sidik jari yang telah terdaftar pada sensor *fingerprint* dan dilakukan sebanyak 10 kali percobaan.

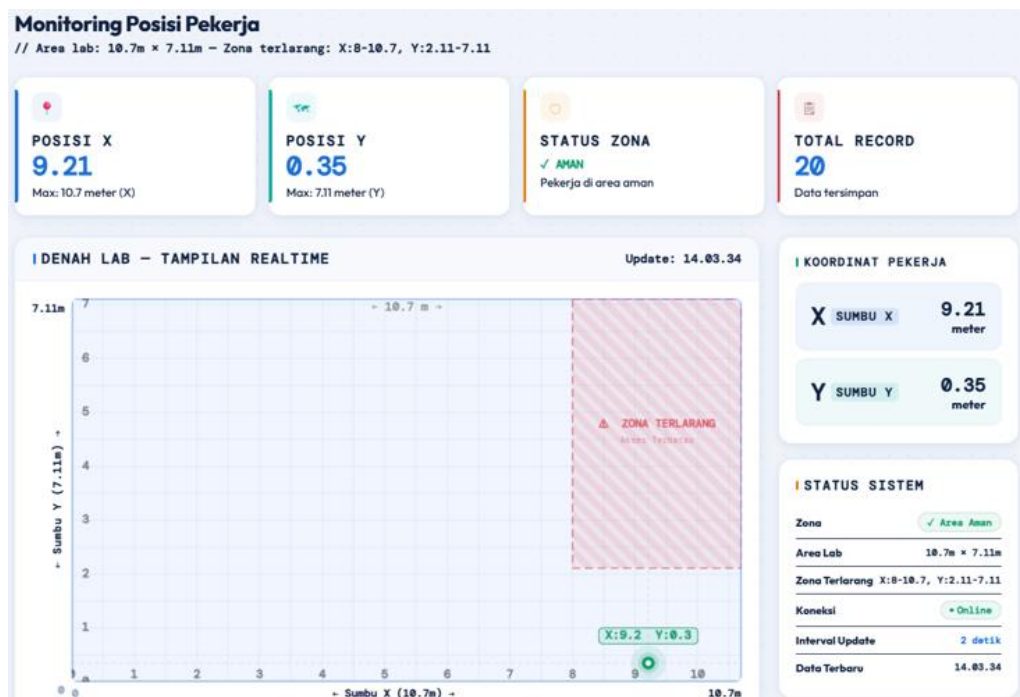
Setiap percobaan diawali dengan menempelkan sidik jari pada sensor *fingerprint*. Apabila sidik jari berhasil dikenali, ESP32 akan memproses hasil autentikasi sebagai pengguna yang sah. Selanjutnya, sistem mengaktifkan proses monitoring sehingga *node* Tag ditampilkan pada halaman *website* monitoring. Sebaliknya, apabila sidik jari tidak dikenali, proses autentikasi

akan ditolak sehingga *node* Tag tidak ditampilkan pada *website* dan sistem monitoring tidak diaktifkan.



Gambar 4. 17 Proses Autentikasi
(Data Pribadi, 2026)

Setelah proses autentikasi berhasil, halaman *website* monitoring akan menampilkan posisi pekerja secara *real-time* berdasarkan koordinat hasil perhitungan sistem IPS menggunakan teknologi UWB. Tampilan *website* yang menunjukkan kemunculan *node* Tag setelah autentikasi berhasil dapat dilihat pada Gambar 4. 18.



Gambar 4. 18 Tag Terdeteksi
(Data Pribadi, 2026)

Tabel 4. 14 Hasil Pengujian Pembacaan Sidik Jari dan Integrasi Sistem

Percobaan Ke-	Sidik Jari Terbaca	Node Tag Muncul di Website	Status Pengujian
1	Ya	Ya	Berhasil
2	Ya	Ya	Berhasil
3	Ya	Ya	Berhasil
4	Ya	Ya	Berhasil
5	Ya	Ya	Berhasil
6	Ya	Ya	Berhasil
7	Ya	Ya	Berhasil
8	Ya	Ya	Berhasil
9	Ya	Ya	Berhasil
10	Ya	Ya	Berhasil

Berdasarkan Tabel 4. 14, seluruh percobaan menunjukkan bahwa sidik jari yang telah terdaftar berhasil dikenali oleh sensor *fingerprint*. Setelah autentikasi berhasil, ESP32 memproses hasil identifikasi dan mengaktifkan sistem monitoring sehingga *node* Tag dapat ditampilkan pada *website* beserta koordinat posisi pekerja secara *real-time*. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi sistem telah berjalan sesuai dengan rancangan sistem.

4.3.2 Pengujian Akses Masuk Ruangan

Pengujian akses masuk ruangan dilakukan untuk memverifikasi mekanisme pemberian hak akses berdasarkan hasil autentikasi *fingerprint*. Pada pengujian ini digunakan dua kondisi, yaitu pengguna yang telah terdaftar pada sistem dan pengguna yang belum terdaftar.

Apabila sidik jari yang dibaca sesuai dengan data yang tersimpan, maka sistem akan memberikan akses dengan mengaktifkan solenoid *door lock* sehingga pintu dapat dibuka. Sebaliknya, apabila sidik jari tidak dikenali, sistem akan menolak akses dan pintu tetap dalam kondisi terkunci. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa mekanisme keamanan ruangan telah berjalan sesuai dengan rancangan, sehingga hanya pengguna yang memiliki hak akses yang dapat memasuki area yang dipantau. Berikut ini merupakan tabel dari hasil pengujian pembacaan sidik jari dengan inetgrasi sistem.

Tabel 4. 15 Hasil Pengujian Pembacaan Sidik Jari dan Integrasi Sistem

No	Kondisi Pengujian	<i>Fingerprint</i>	Solenoid	Status Pintu
1	Sidik jari terdaftar	Dikenali	Aktif	Terbuka
2	Sidik jari tidak terdaftar	Tidak dikenali	Tidak aktif	Tertutup
3	Sidik jari terdaftar	Dikenali	Aktif	Terbuka
4	Sidik jari tidak terdaftar	Tidak dikenali	Tidak aktif	Tertutup
5	Sidik jari terdaftar	Dikenali	Aktif	Terbuka
6	Sidik jari tidak terdaftar	Tidak dikenali	Tidak aktif	Tertutup
7	Sidik jari terdaftar	Dikenali	Aktif	Terbuka
8	Sidik jari tidak terdaftar	Tidak dikenali	Tidak aktif	Tertutup
9	Sidik jari terdaftar	Dikenali	Aktif	Terbuka
10	Sidik jari tidak terdaftar	Tidak dikenali	Tidak aktif	Tertutup

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.15, sistem berhasil mengendalikan akses masuk ruangan sesuai dengan hasil proses verifikasi sidik jari. Dari 10 kali pengujian, yang terdiri atas 5 kali menggunakan sidik jari terdaftar dan 5 kali menggunakan sidik jari tidak terdaftar, seluruh skenario menghasilkan respons yang sesuai dengan logika sistem yang telah dirancang. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi antar sensor bekerja dengan baik sehingga mekanisme kontrol akses dapat diimplementasikan sesuai dengan fungsi yang diharapkan.

Tabel 4. 16 Dokumentasi Kondisi Pengujian Sistem Autentikasi *Fingerprint*

Kondisi Pengujian	<i>Fingerprint</i>	Solenoid
Sidik jari terdaftar		

Kondisi Pengujian	<i>Fingerprint</i>	Solenoid
Sidik jari tidak terdaftar		

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada tabel diatas, sistem autentikasi *fingerprint* mampu menjalankan mekanisme kontrol akses sesuai dengan rancangan. Pada kondisi ketika sidik jari yang digunakan telah terdaftar pada sensor *fingerprint*, sistem berhasil mengenali identitas pengguna dan memberikan hak akses masuk ruangan. Sebaliknya, ketika sidik jari yang digunakan tidak terdaftar, sistem menolak proses autentikasi sehingga akses masuk tidak diberikan.

Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa sistem telah berhasil menerapkan mekanisme keamanan berbasis autentikasi *fingerprint* sebagai syarat utama pemberian akses masuk ruangan.

4.4 Pengujian Sistem *Indoor Positioning* (UWB)

Pengujian sistem *Indoor Positioning System* (IPS) menggunakan teknologi *Ultra-Wideband* (UWB) dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menentukan posisi tag berdasarkan koordinat hasil perhitungan metode trilaterasi. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh konfigurasi penempatan anchor yang menghasilkan tingkat akurasi terbaik, serta mengetahui pengaruh kondisi lingkungan terhadap hasil estimasi posisi. Tahapan pengujian meliputi analisis penempatan anchor optimal, pengujian sistem pada skala ruangan, serta pengujian pada kondisi *Line of Sight* (LoS) dan *Non-Line of Sight* (NLoS).

4.4.1 Penempatan Tag Untuk Pekerja

Penempatan tag *Ultra-Wideband* (UWB) pada helm pekerja dilakukan sebagai bagian dari implementasi sistem *Indoor Positioning System* (IPS)

untuk memperoleh informasi posisi pekerja secara *real-time*. Tag berfungsi sebagai perangkat yang mengirimkan dan menerima sinyal UWB dengan anchor sehingga koordinat posisi pekerja dapat dihitung menggunakan metode trilaterasi. Oleh karena itu, penempatan tag harus mempertimbangkan aspek kenyamanan pengguna, keamanan perangkat, serta kualitas propagasi sinyal selama proses pengukuran.

Pada penelitian ini, tag ditempatkan pada bagian atas helm keselamatan menggunakan *box* pelindung yang dirancang untuk melindungi rangkaian elektronik dari benturan maupun kerusakan selama penggunaan. Penempatan pada helm dipilih karena posisi tersebut selalu mengikuti pergerakan pekerja tanpa mengganggu aktivitas kerja. Selain itu, posisi tag yang berada di bagian atas tubuh memberikan peluang lebih baik untuk memperoleh jalur propagasi sinyal menuju anchor dibandingkan apabila tag ditempatkan pada saku atau bagian tubuh lain yang lebih mudah terhalang oleh tubuh pengguna.

Dengan penempatan tersebut, tag dapat mengirimkan dan menerima sinyal UWB secara lebih stabil sehingga koordinat hasil estimasi yang diperoleh dari metode trilaterasi dapat ditampilkan pada *website* monitoring secara *real-time*. Desain penempatan tag pada helm pekerja ditunjukkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4. 19 Penempatan Tag Untuk Pekerja
(Data Pribadi, 2026)

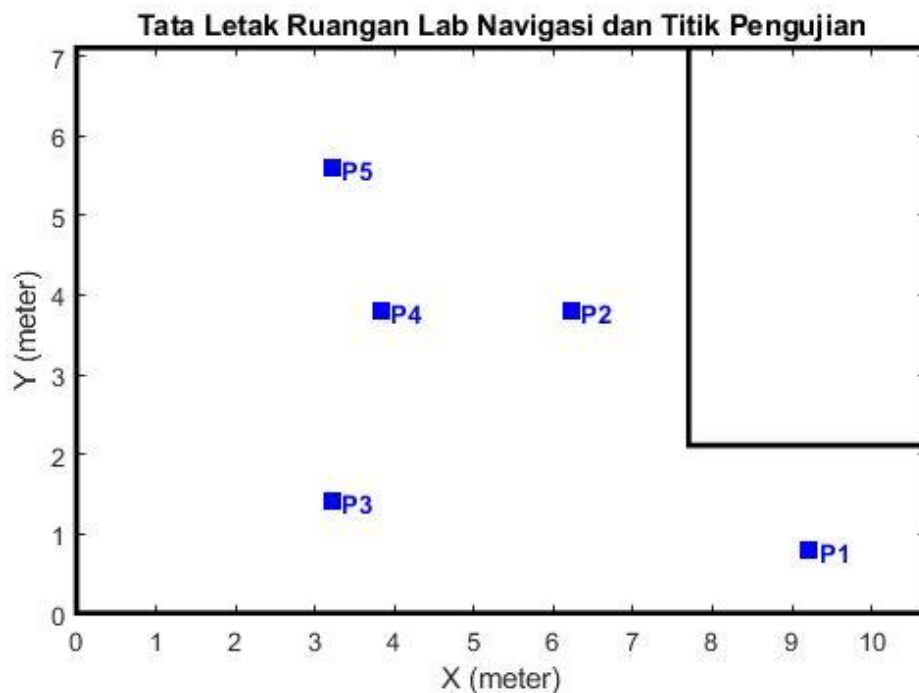
Berdasarkan hasil implementasi, penempatan tag pada helm mampu mendukung proses pemantauan posisi pekerja selama pengujian berlangsung. Posisi tag yang berada pada bagian atas helm memungkinkan perangkat mengikuti setiap pergerakan pekerja di area pengujian sehingga koordinat yang dihasilkan dapat ditampilkan secara *real-time* pada *website* monitoring. Selain

itu, penggunaan box pelindung juga membantu menjaga perangkat dari benturan ringan selama proses pengujian tanpa mengurangi fungsi utama tag sebagai perangkat penentu posisi.

4.4.2 Analisis Penempatan Anchor Optimal

Analisis penempatan anchor dilakukan untuk menentukan konfigurasi anchor yang memberikan hasil estimasi posisi paling akurat pada area pengujian. Pengujian dilakukan menggunakan tiga skenario penempatan anchor yang berbeda dengan jumlah perangkat terdiri atas tiga anchor dan satu tag.

Pada setiap skenario, tag digerakkan menuju lima titik pengujian yang telah ditentukan di dalam ruangan. Ilustrasi posisi titik pengujian yaitu pada Gambar 4. 20. Parameter yang diamati pada setiap skenario meliputi koordinat hasil estimasi juga persentase *error* pada sumbu x dan sumbu y. Hasil dari ketiga skenario kemudian dibandingkan untuk menentukan konfigurasi penempatan anchor yang paling optimal dan digunakan pada pengujian selanjutnya.

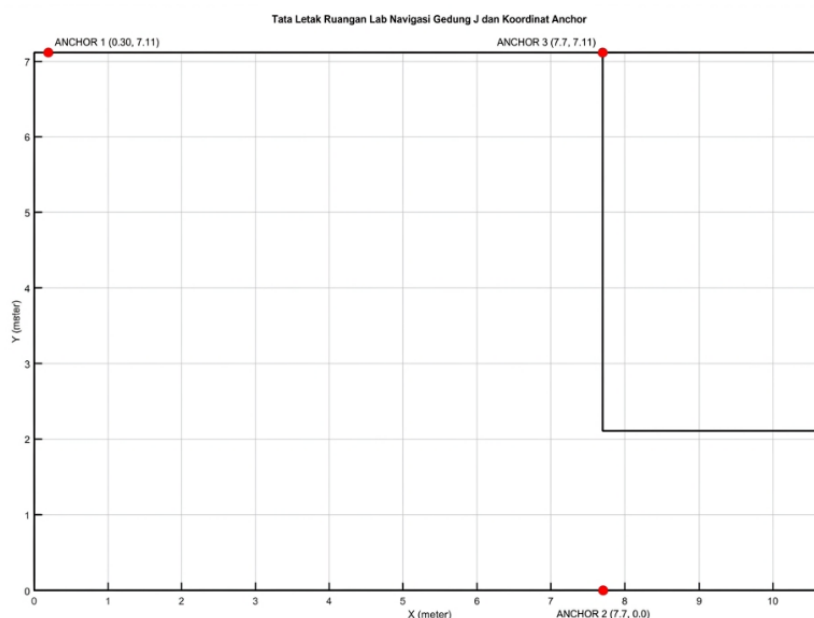


Gambar 4. 20 Ilustrasi Titik Pengujian
(Data Pribadi, 2026)

4.4.2.1 Skenario 1 Penempatan Anchor

Pada skenario pertama, pengujian dilakukan dengan penempatan tiga

anchor pada posisi yang telah ditentukan di dalam area pengujian. Titik koordinat masing-masing anchor adalah Anchor 1 (0.30, 7.11), Anchor 2 (7.7, 0.0), dan Anchor 3 (7.70, 7.11), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. 21.



Gambar 4. 21 Ilustrasi Penempatan Anchor Skenario 1
(Data Pribadi,2026)

Selanjutnya, tag dipindahkan menuju lima titik pengujian yang telah ditentukan di dalam ruangan. Pada setiap titik dilakukan lima kali pengukuran untuk memperoleh data koordinat hasil pembacaan alat.

Tabel 4. 17 Hasil Pengujian Skenario 1

Titik (Koordinat Real)	Koordinat P1 (X,Y)	Koordinat P2 (X,Y)	Koordinat P3 (X,Y)	Koordinat P4 (X,Y)	Koordinat P5 (X,Y)
	Alat	Alat	Alat	Alat	Alat
Titik 1 (9.22, 0.79)	(9.14, 0.85)	(9.13, 0.83)	(9.13, 0.84)	(9.14, 0.85)	(9.12, 0.85)
Titik 2 (6.22, 3.79)	(6.36, 3.70)	(6.35, 3.71)	(6.35, 3.70)	(6.36, 3.70)	(6.36, 3.70)
Titik 3 (3.22, 1.40)	(3.31, 1.45)	(3.29, 1.47)	(3.32, 1.47)	(3.32, 1.46)	(3.31, 1.47)
Titik 4 (3.83, 3.79)	(3.71, 3.69)	(3.71, 3.70)	(3.71, 3.70)	(3.71, 3.70)	(3.70, 3.71)
Titik 5 (3.22, 5.60)	(3.25, 5.22)	(3.26, 5.21)	(3.25, 5.19)	(3.26, 5.22)	(3.26, 5.22)

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.17, diperoleh koordinat estimasi posisi tag pada lima titik pengujian dengan masing-masing titik dilakukan sebanyak lima kali percobaan. Secara umum, koordinat hasil estimasi menunjukkan adanya perbedaan terhadap koordinat sebenarnya pada setiap titik pengujian. Perbedaan tersebut terlihat dari adanya penyimpangan pada sumbu X maupun sumbu Y yang bervariasi di setiap percobaan. Meskipun demikian, hasil estimasi masih mengikuti pola perpindahan titik sebenarnya sehingga proses trilaterasi menggunakan tiga anchor mampu menghasilkan posisi tag pada area pengujian. Selanjutnya, untuk mengetahui tingkat ketelitian sistem pada setiap titik pengujian dilakukan analisis terhadap nilai *error* koordinat yang disajikan pada Tabel 4.18.

Tabel 4. 18 *Error* Koordinat Real dengan Koordinat Alat

Titik	Percobaan	X Real (m)	X Alat (m)	ΔX (m)	Y Real (m)	Y Alat (m)	ΔY (m)	<i>Error</i> X (%)	<i>Error</i> Y (%)
1	P1	9.22	9.14	0.08	0.79	0.85	0.06	0.86%	7.59%
	P2	9.22	9.13	0.09	0.79	0.83	0.04	0.98%	5.06%
	P3	9.22	9.13	0.09	0.79	0.84	0.05	0.98%	6.33%
	P4	9.22	9.14	0.08	0.79	0.85	0.06	0.86%	7.59%
	P5	9.22	9.12	0.1	0.79	0.85	0.06	1.08%	7.59%
Rata – rata <i>Error</i> %								0.95%	6.83%
2	P1	6.22	6.36	0.14	3.79	3.70	0.09	2.25%	2.37%
	P2	6.22	6.35	0.13	3.79	3.71	0.08	2.09%	2.11%
	P3	6.22	6.35	0.13	3.79	3.70	0.09	2.09%	2.37%
	P4	6.22	6.36	0.14	3.79	3.70	0.09	2.25%	2.37%
	P5	6.22	6.36	0.14	3.79	3.70	0.09	2.25%	2.37%
Rata – rata <i>Error</i> %								2.17%	2.32%
3	P1	3.22	3.31	0.09	1.40	1.45	0.05	2.79%	3.57%
	P2	3.22	3.29	0.07	1.40	1.47	0.07	2.17%	5%
	P3	3.22	3.32	0.1	1.40	1.47	0.07	3.11%	5%
	P4	3.22	3.32	0.1	1.40	1.46	0.06	3.11%	4.29%
	P5	3.22	3.31	0.09	1.40	1.47	0.07	2.79%	5%
Rata – rata <i>Error</i> %								2.79%	4.47%
4	P1	3.83	3.71	0.12	3.79	3.69	0.1	3.13%	2.64%
	P2	3.83	3.71	0.12	3.79	3.70	0.09	3.13%	2.37%

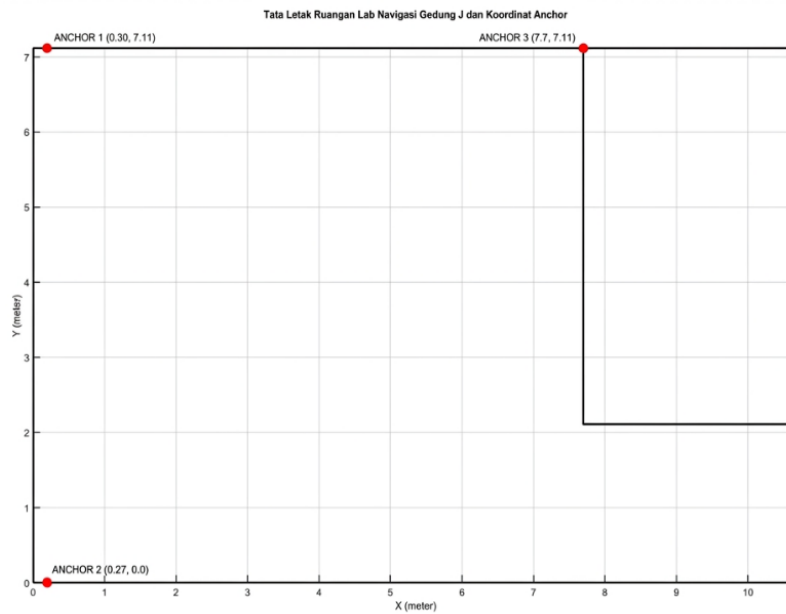
Titik	Percobaan	X Real (m)	X Alat (m)	ΔX (m)	Y Real (m)	Y Alat (m)	ΔY (m)	Error X (%)	Error Y (%)
	P3	3.83	3.71	0.12	3.79	3.70	0.09	3.13%	2.37%
	P4	3.83	3.71	0.12	3.79	3.70	0.09	3.13%	2.37%
	P5	3.83	3.70	0.13	3.79	3.71	0.08	3.39%	2.11%
Rata – rata <i>Error</i> %								3.18%	2.37%
5	P1	3.22	3.25	0.03	5.60	5.22	0.38	0.93%	6.79%
	P2	3.22	3.26	0.04	5.60	5.21	0.39	1.24%	6.96%
	P3	3.22	3.25	0.03	5.60	5.19	0.41	0.93%	7.32%
	P4	3.22	3.26	0.04	5.60	5.22	0.38	1.24%	6.79%
	P5	3.22	3.26	0.04	5.60	5.22	0.38	1.24%	6.79%
Rata – rata <i>Error</i> %								1.12%	6.93%

Berdasarkan Tabel 4.18, diperoleh nilai rata-rata *error* sumbu X sebesar 2.04% dan *error* sumbu Y sebesar 4.58% pada skenario 1. Nilai *error* terbesar pada sumbu Y terjadi pada titik pengujian 5 dengan rata-rata 6.93%, sedangkan *error* terkecil terdapat pada titik pengujian 4 sebesar 2,37%. Untuk sumbu X, nilai *error* terbesar terjadi pada titik pengujian 4 sebesar 3.18%, sedangkan nilai terkecil diperoleh pada titik pengujian 1 sebesar 0,95%.

Perbedaan tingkat *error* antara sumbu X dan sumbu Y menunjukkan bahwa estimasi posisi pada skenario 1 dipengaruhi oleh geometri penempatan anchor yang menyebabkan sensitivitas pengukuran. Selain itu, karakteristik propagasi sinyal UWB di lingkungan *indoor*, seperti efek *multipath* akibat pantulan sinyal dari dinding dan objek di sekitar area pengujian, turut memengaruhi hasil estimasi posisi. Oleh karena itu, skenario 1 masih memerlukan evaluasi terhadap konfigurasi penempatan anchor untuk memperoleh distribusi *error* yang lebih merata pada kedua sumbu koordinat.

4.4.2.2 Skenario 2 Penempatan Anchor

Pada skenario kedua, pengujian dilakukan dengan perubahan posisi penempatan ketiga anchor dibandingkan skenario pertama. Titik koordinat Anchor 1, Anchor 2, dan Anchor 3 masing-masing berada pada posisi (0.30, 7.11), (0.27, 0.0), dan (7.70, 7.11), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4. 22 Ilustrasi Penempatan Anchor Skenario 2
(Data Pribadi,2026)

Selanjutnya, tag dipindahkan menuju lima titik pengujian sama yang telah ditentukan di dalam ruangan. Pada setiap titik dilakukan lima kali pengukuran untuk memperoleh data koordinat.

Tabel 4. 19 Hasil Pengujian Skenario 2

Titik (Koordinat Real)	Koordinat P1 (X,Y)	Koordinat P2 (X,Y)	Koordinat P3 (X,Y)	Koordinat P4 (X,Y)	Koordinat P5 (X,Y)
	Alat	Alat	Alat	Alat	Alat
Titik 1 (9.22, 0.79)	(9.59, 0.73)	(9.60, 0.74)	(9.60, 0.74)	(9.59, 0.70)	(9.60, 0.73)
Titik 2 (6.22, 3.79)	(6.19, 3.76)	(6.18, 3.69)	(6.18, 3.67)	(6.20, 3.76)	(6.19, 3.76)
Titik 3 (3.22, 1.40)	(3.31, 1.34)	(3.29, 1.36)	(3.29, 1.36)	(3.30, 1.34)	(3.31, 1.34)
Titik 4 (3.83, 3.79)	(3.88, 3.65)	(3.90, 3.73)	(3.90, 3.73)	(3.91, 3.77)	(3.90, 3.73)
Titik 5 (3.22, 5.60)	(3.31, 5.54)	(3.31, 5.55)	(3.29, 5.55)	(3.27, 5.58)	(3.31, 5.55)

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.19 diatas diperoleh koordinat estimasi posisi tag pada lima titik pengujian dengan konfigurasi penempatan anchor skenario 2.

Tabel 4. 20 *Error* Koordinat Real dengan Koordinat Alat

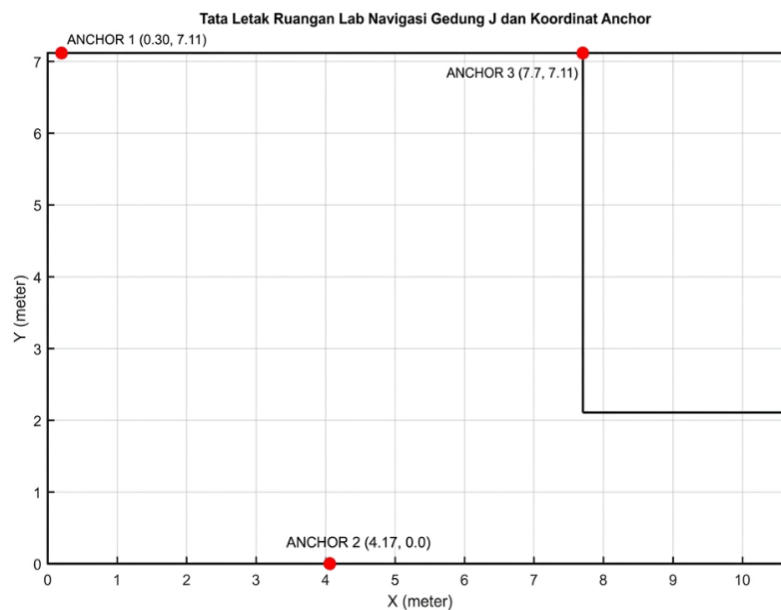
Titik	Percobaan	X Real (m)	X Alat (m)	ΔX (m)	Y Real (m)	Y Alat (m)	ΔY (m)	<i>Error</i> X (%)	<i>Error</i> Y (%)
1	P1	9.22	9.59	0.37	0.79	0.73	0.06	4.01%	7.58%
	P2	9.22	9.60	0.38	0.79	0.74	0.05	4.12%	6.33%
	P3	9.22	9.60	0.38	0.79	0.74	0.05	4.12%	6.33%
	P4	9.22	9.59	0.37	0.79	0.70	0.09	4.01%	11.40%
	P5	9.22	9.60	0.38	0.79	0.73	0.06	4.12%	7.58%
Rata – rata <i>Error</i> %								4.08%	7.84%
2	P1	6.22	6.19	0.03	3.79	3.76	0.03	0.48%	0.79%
	P2	6.22	6.18	0.04	3.79	3.69	0.1	0.64%	2.63%
	P3	6.22	6.18	0.04	3.79	3.67	0.12	0.64%	3.17%
	P4	6.22	6.20	0.02	3.79	3.76	0.03	0.32%	0.79%
	P5	6.22	6.19	0.03	3.79	3.76	0.03	0.48%	0.79%
Rata – rata <i>Error</i> %								0.51%	1.63%
3	P1	3.22	3.31	0.09	1.40	1.34	0.06	2.80%	4.29%
	P2	3.22	3.29	0.07	1.40	1.36	0.04	2.17%	2.86%
	P3	3.22	3.29	0.07	1.40	1.36	0.04	2.17%	2.86%
	P4	3.22	3.30	0.08	1.40	1.34	0.06	2.49%	4.29%
	P5	3.22	3.31	0.09	1.40	1.34	0.06	2.80%	4.29%
Rata – rata <i>Error</i> %								2.49%	3.72%
4	P1	3.83	3.88	0.05	3.79	3.65	0.14	1.31%	3.70%
	P2	3.83	3.90	0.07	3.79	3.73	0.06	1.83%	1.69%
	P3	3.83	3.90	0.07	3.79	3.73	0.06	1.83%	1.69%
	P4	3.83	3.91	0.08	3.79	3.77	0.02	2.09%	0.53%
	P5	3.83	3.90	0.07	3.79	3.73	0.06	1.83%	1.69%
Rata – rata <i>Error</i> %								1.78%	1.86%
5	P1	3.22	3.31	0.09	5.60	5.54	0.06	2.80%	1.07%
	P2	3.22	3.31	0.09	5.60	5.55	0.05	2.80%	0.90%
	P3	3.22	3.29	0.07	5.60	5.55	0.05	2.17%	0.90%
	P4	3.22	3.27	0.05	5.60	5.58	0.02	1.55%	0.36%
	P5	3.22	3.31	0.09	5.60	5.55	0.05	2.80%	0.90%
Rata – rata <i>Error</i> %								2.42%	0.83%

Berdasarkan Tabel 4.20 apabila dibandingkan dengan skenario 1, konfigurasi penempatan anchor pada skenario 2 menghasilkan rata-rata *error*

yang lebih kecil sehingga menunjukkan bahwa perubahan posisi anchor berpengaruh terhadap akurasi estimasi posisi. Meskipun demikian, variasi *error* masih dapat dipengaruhi oleh karakteristik propagasi sinyal UWB di lingkungan *indoor*, seperti efek *multipath*, pantulan sinyal dari dinding maupun objek di sekitar area pengujian, serta perbedaan jarak antara tag dengan masing-masing anchor.

4.4.2.3 Skenario 3 Penempatan Anchor

Pada skenario ketiga juga dilakukan pengujian dengan perubahan posisi penempatan ketiga anchor dibandingkan skenario pertama dan kedua. Titik koordinat Anchor 1, Anchor 2, dan Anchor 3 masing-masing berada pada posisi (0.30, 7.11), (4.17, 0.0), dan (7.70, 7.11), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. 23. Perubahan posisi tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh konfigurasi penempatan anchor terhadap hasil estimasi posisi tag pada area pengujian.



Gambar 4. 23 Ilustrasi Penempatan Anchor Skenario 3
(Data Pribadi,2026)

Selanjutnya, tag dipindahkan menuju lima titik pengujian. Pada setiap titik tersebut dilakukan lima kali pengukuran untuk memperoleh data koordinat hasil estimasi atau pembacaan alat. Berikut ini merupakan tabel hasil dari pengujian skenario 3.

Tabel 4. 21 Hasil Pengujian Skenario 3

Titik (Koordinat Real)	Koordinat P1 (X,Y)	Koordinat P2 (X,Y)	Koordinat P3 (X,Y)	Koordinat P4 (X,Y)	Koordinat P5 (X,Y)
	Alat	Alat	Alat	Alat	Alat
Titik 1 (9.22, 0.79)	(8.65, 0.70)	(8.68, 0.72)	(8.68, 0.72)	(8.62, 0.70)	(8.68, 0.72)
Titik 2 (6.22, 3.79)	(5.87, 3.71)	(5.86, 3.72)	(5.87, 3.72)	(5.87, 7.30)	(5.86, 7.32)
Titik 3 (3.22, 1.40)	(3.31, 1.49)	(3.30, 1.47)	(3.30, 1.48)	(3.31, 1.49)	(3.31, 1.48)
Titik 4 (3.83, 3.79)	(3.93, 3.89)	(3.93, 3.87)	(3.94, 3.89)	(3.94, 3.89)	(3.94, 3.87)
Titik 5 (3.22, 5.60)	(3.32, 5.68)	(3.31, 5.68)	(3.31, 5.68)	(3.32, 5.71)	(3.33, 5.71)

Pada skenario 3, pengujian dilakukan dengan konfigurasi penempatan anchor yang berbeda dari dua skenario sebelumnya. Pengambilan data dilakukan pada lima titik pengujian dengan masing-masing titik diukur sebanyak lima kali untuk memperoleh koordinat hasil estimasi posisi. Berdasarkan Tabel 4.21, hasil estimasi menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi posisi tag pada seluruh titik pengujian. Meskipun demikian, masih terdapat selisih antara koordinat hasil estimasi dan koordinat sebenarnya yang besarnya bervariasi pada setiap titik.

Tabel 4. 22 Error Koordinat Real dengan Koordinat Alat

Titik	Percobaan	X Real (m)	X Alat (m)	ΔX (m)	Y Real (m)	Y Alat (m)	ΔY (m)	Error X (%)	Error Y (%)
1	P1	9.22	8.65	0.57	0.79	0.70	0.09	6.18%	11.40%
	P2	9.22	8.68	0.54	0.79	0.72	0.07	5.86%	8.86%
	P3	9.22	8.68	0.54	0.79	0.72	0.07	5.86%	8.86%
	P4	9.22	8.62	0.6	0.79	0.70	0.09	6.51%	11.40%
	P5	9.22	8.68	0.54	0.79	0.72	0.07	5.86%	8.86%
Rata – rata Error %								6.05%	9.88%
2	P1	6.22	5.87	0.35	3.79	3.71	0.08	5.63%	2.11%
	P2	6.22	5.86	0.36	3.79	3.72	0.07	5.79%	1.84%
	P3	6.22	5.87	0.35	3.79	3.72	0.07	5.63%	1.84%

Titik	Percobaan	X Real (m)	X Alat (m)	ΔX (m)	Y Real (m)	Y Alat (m)	ΔY (m)	Error X (%)	Error Y (%)
	P4	6.22	5.87	0.35	3.79	3.70	0.09	5.63%	2.37%
	P5	6.22	5.86	0.36	3.79	3.72	0.07	5.79%	1.84%
Rata – rata Error %								5.70%	2.00%
3	P1	3.22	3.31	0.09	1.40	1.49	0.09	2.80%	6.43%
	P2	3.22	3.30	0.08	1.40	1.47	0.07	2.48%	5.00%
	P3	3.22	3.30	0.08	1.40	1.48	0.08	2.48%	5.71%
	P4	3.22	3.31	0.09	1.40	1.49	0.09	2.80%	6.43%
	P5	3.22	3.31	0.09	1.40	1.48	0.08	2.80%	5.71%
Rata – rata Error %								2.67%	5.86%
4	P1	3.83	3.93	0.1	3.79	3.89	0.1	2.61%	2.64%
	P2	3.83	3.93	0.1	3.79	3.87	0.08	2.61%	2.11%
	P3	3.83	3.94	0.11	3.79	3.89	0.1	2.87%	2.64%
	P4	3.83	3.94	0.11	3.79	3.89	0.1	2.87%	2.64%
	P5	3.83	3.94	0.11	3.79	3.87	0.08	2.87%	2.11%
Rata – rata Error %								2.77%	2.43%
5	P1	3.22	3.32	0.1	5.60	5.68	0.08	3.11%	1.43%
	P2	3.22	3.31	0.09	5.60	5.68	0.08	2.78%	1.43%
	P3	3.22	3.31	0.09	5.60	5.68	0.08	2.78%	1.43%
	P4	3.22	3.32	0.1	5.60	5.71	0.11	3.11%	1.96%
	P5	3.22	3.33	0.11	5.60	5.71	0.11	3.42%	1.96%
Rata – rata Error %								3.04%	1.64%

Berdasarkan hasil pengujian pada ketiga skenario penempatan anchor, diperoleh data berupa koordinat hasil estimasi posisi tag pada setiap titik pengujian. Perbandingan hasil pengujian dari ketiga skenario penempatan anchor disajikan pada Tabel 4. 23.

Tabel 4. 23 Perbandingan Hasil Pengujian Tiga Skenario Penempatan Anchor

Skenario	Rata-rata Error X (%)	Rata-rata Error Y (%)
1	2.04%	4.58%
2	2.26%	3.18%
3	4.05%	4.36%

Berdasarkan Tabel 4. 23, terlihat bahwa setiap skenario penempatan anchor menghasilkan tingkat akurasi yang berbeda. Perbedaan tersebut ditunjukkan oleh nilai *error* yang diperoleh pada masing-masing skenario. Hal ini menunjukkan bahwa posisi penempatan anchor berpengaruh terhadap kualitas estimasi posisi yang dihasilkan oleh sistem *Indoor Positioning System* (IPS).

Dari hasil perbandingan tersebut, skenario 2 memperoleh nilai rata-rata *error* sumbu x dan y paling kecil dibandingkan skenario lainnya. Oleh karena itu, penempatan anchor pada skenario tersebut dipilih sebagai penempatan anchor optimal dan digunakan sebagai acuan pada tahap pengujian berikutnya. Selanjutnya, penempatan anchor yang telah dipilih tersebut digunakan pada pengujian sistem pada skala ruangan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menentukan posisi tag pada area pengujian. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui performa sistem IPS berbasis UWB pada kondisi operasional dengan menggunakan penempatan anchor yang memberikan tingkat akurasi terbaik.

4.4.3 Pengujian Sistem pada Skala Ruangan

Berdasarkan hasil analisis pada subbab sebelumnya, skenario 2 dipilih sebagai konfigurasi penempatan anchor yang digunakan pada tahap pengujian sistem karena menghasilkan nilai *error* koordinat paling kecil dibandingkan skenario 1 dan skenario 3. Oleh karena itu, konfigurasi tersebut dianggap mampu memberikan akurasi estimasi posisi yang lebih baik dan digunakan sebagai konfigurasi tetap pada pengujian sistem di skala ruangan.

Pengujian sistem pada skala ruangan dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem *Indoor Positioning System* (IPS) dalam menentukan posisi tag secara *real-time* pada area pengujian yang lebih luas. Berbeda dengan pengujian penempatan anchor yang hanya menggunakan lima titik pengujian, pada tahap ini jumlah titik pengujian ditambah menjadi sepuluh titik yang tersebar di berbagai posisi di dalam ruangan. Penambahan titik pengujian bertujuan untuk memperoleh evaluasi yang lebih representatif terhadap performa sistem pada seluruh area pengujian serta mengetahui konsistensi

akurasi estimasi posisi di berbagai lokasi.

Pada setiap titik pengujian dilakukan lima kali pengambilan data untuk memperoleh koordinat estimasi posisi tag. Selanjutnya, koordinat hasil pengukuran dibandingkan dengan koordinat sebenarnya sehingga dapat dihitung nilai selisih koordinat, *error* posisi, serta persentase *error* sebagai parameter evaluasi kinerja sistem. Hasil pengujian untuk titik ke-1 sampai titik ke-10 disajikan pada Tabel 4.24.

Tabel 4. 24 Hasil Pengujian Sistem pada Skala Ruangan

Titik (Koordinat Real)	Koordinat P1 (X,Y)	Koordinat P2 (X,Y)	Koordinat P3 (X,Y)	Koordinat P4 (X,Y)	Koordinat P5 (X,Y)
	Alat	Alat	Alat	Alat	Alat
Titik 1 (9.22, 0.79)	(9.59, 0.73)	(9.60, 0.74)	(9.60, 0.74)	(9.59, 0.70)	(9.60, 0.73)
Titik 2 (6.22, 3.79)	(6.19, 3.76)	(6.18, 3.69)	(6.18, 3.67)	(6.20, 3.76)	(6.19, 3.76)
Titik 3 (3.22, 1.40)	(3.31, 1.34)	(3.29, 1.36)	(3.29, 1.36)	(3.30, 1.34)	(3.31, 1.34)
Titik 4 (3.83, 3.79)	(3.88, 3.65)	(3.90, 3.73)	(3.90, 3.73)	(3.91, 3.77)	(3.90, 3.73)
Titik 5 (3.22, 5.60)	(3.31, 5.54)	(3.31, 5.55)	(3.29, 5.55)	(3.27, 5.58)	(3.31, 5.55)
Titik 6 (6.22, 1.99)	(6.31, 1.94)	(6.30, 1.96)	(6.30, 1.96)	(6.30, 1.95)	(6.30, 1.96)
Titik 7 (0.83, 2.00)	(0.90, 2.10)	(0.92, 2.08)	(0.92, 2.08)	(0.89, 2.08)	(0.89, 2.08)
Titik 8 (1.43, 3.79)	(1.51, 3.78)	(1.50, 3.78)	(1.51, 3.77)	(1.51, 3.77)	(1.49, 3.76)
Titik 9 (0.83, 5.60)	(0.91, 5.69)	(0.89, 5.68)	(0.92, 5.68)	(0.92, 5.68)	(0.91, 5.68)
Titik 10 (6.22, 5.60)	(6.18, 5.63)	(6.19, 5.67)	(6.19, 5.63)	(6.15, 5.69)	(6.18, 5.63)

Berdasarkan data koordinat hasil pengujian pada Tabel 4.24, selanjutnya dilakukan analisis dengan membandingkan koordinat estimasi terhadap koordinat sebenarnya. Hasil perhitungan *error* koordinat real terhadap koordinat alat disajikan pada Tabel 4.25.

Tabel 4. 25 *Error* Koordinat Real dengan Koordinat Alat

Titik	Percobaan	X Real (m)	X Alat (m)	ΔX (m)	Y Real (m)	Y Alat (m)	ΔY (m)	Error X (%)	Error Y (%)
6	P1	6.22	6.31	0.09	1.99	1.94	0.05	1.45%	2.51%
	P2	6.22	6.30	0.08	1.99	1.96	0.03	1.29%	1.51%
	P3	6.22	6.30	0.08	1.99	1.96	0.03	1.29%	1.51%
	P4	6.22	6.30	0.08	1.99	1.95	0.04	1.29%	2.01%
	P5	6.22	6.30	0.08	1.99	1.96	0.03	1.29%	1.51%
Rata – rata <i>Error</i> %								1.32%	1.81%
7	P1	0.83	0.90	0.07	2.00	2.10	0.1	8.43%	5.00%
	P2	0.83	0.92	0.09	2.00	2.08	0.08	10.84%	4.00%
	P3	0.83	0.92	0.09	2.00	2.08	0.08	10.84%	4.00%
	P4	0.83	0.89	0.06	2.00	2.08	0.08	7.23%	4.00%
	P5	0.83	0.89	0.06	2.00	2.08	0.08	7.23%	4.00%
Rata – rata <i>Error</i> %								8.91%	4.20%
8	P1	1.43	1.51	0.08	3.79	3.78	0.01	5.51%	0.26%
	P2	1.43	1.50	0.07	3.79	3.78	0.01	4.90%	0.26%
	P3	1.43	1.51	0.08	3.79	3.77	0.02	5.51%	0.53%
	P4	1.43	1.51	0.08	3.79	3.77	0.02	5.51%	0.53%
	P5	1.43	1.49	0.06	3.79	3.76	0.03	4.20%	0.79%
Rata – rata <i>Error</i> %								4.02%	0.47%
9	P1	0.83	0.91	0.08	5.60	5.69	0.09	9.64%	1.61%
	P2	0.83	0.89	0.06	5.60	5.68	0.08	7.23%	1.43%
	P3	0.83	0.92	0.09	5.60	5.68	0.08	10.84%	1.43%
	P4	0.83	0.92	0.09	5.60	5.68	0.08	10.84%	1.43%
	P5	0.83	0.91	0.08	5.60	5.68	0.08	9.64%	1.43%
Rata – rata <i>Error</i> %								9.64%	1.47%
10	P1	6.22	6.18	0.04	5.60	5.63	0.03	0.64%	0.54%
	P2	6.22	6.19	0.03	5.60	5.67	0.07	0.48%	1.25%
	P3	6.22	6.19	0.03	5.60	5.63	0.03	0.48%	0.54%
	P4	6.22	6.15	0.07	5.60	5.69	0.09	1.13%	1.61%
	P5	6.22	6.18	0.04	5.60	5.63	0.03	0.64%	0.54%
Rata – rata <i>Error</i> %								1.07%	0.90%

Berdasarkan hasil pengujian pada sepuluh titik pengujian dengan menggunakan penempatan anchor optimal yaitu pada skenario 2, sistem *Indoor*

Positioning System (IPS) berbasis *Ultra-Wideband* mampu menghasilkan estimasi posisi yang mendekati koordinat sebenarnya. Pada setiap titik pengujian dilakukan sebanyak lima kali pengambilan data, kemudian hasilnya dirata-ratakan untuk memperoleh nilai koordinat estimasi yang lebih representatif.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata persentase *error* pada koordinat sumbu X sebesar 3,62%, sedangkan rata-rata persentase *error* pada koordinat sumbu Y sebesar 2,47%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dalam menentukan posisi tag pada area pengujian. Perbedaan nilai *error* antara sumbu X dan sumbu Y menunjukkan bahwa tingkat akurasi estimasi posisi dipengaruhi oleh geometri penempatan anchor serta kondisi lingkungan di area pengujian.

Meskipun penempatan anchor telah menggunakan skenario yang paling optimal, masih terdapat selisih antara koordinat aktual dan koordinat hasil estimasi. Hal tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah efek *multipath*, yaitu kondisi ketika sinyal UWB mengalami pemantulan pada permukaan dinding, lantai, pintu, logam/besi maupun objek lain di dalam ruangan sebelum diterima oleh tag.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa penggunaan penempatan anchor optimal pada Skenario 2 memberikan performa terbaik dibandingkan skenario lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan posisi anchor merupakan salah satu faktor penting dalam meningkatkan akurasi sistem *Indoor Positioning System* (IPS) berbasis Ultra-Wide-Band (UWB).

4.4.4 Pengujian Kondisi *Line of Sight* (LoS) dan *Non-Line of Sight* (NLoS)

Pengujian kondisi *Line of Sight* (LoS) dan *Non-Line of Sight* (NLoS) dilakukan untuk menganalisis pengaruh keberadaan penghalang terhadap kinerja sistem *Indoor Positioning System* (IPS). Pengujian ini menggunakan penempatan anchor terbaik yang telah diperoleh pada Subbab 4.4.1.

Pada pengujian kondisi LoS, tag ditempatkan pada empat titik

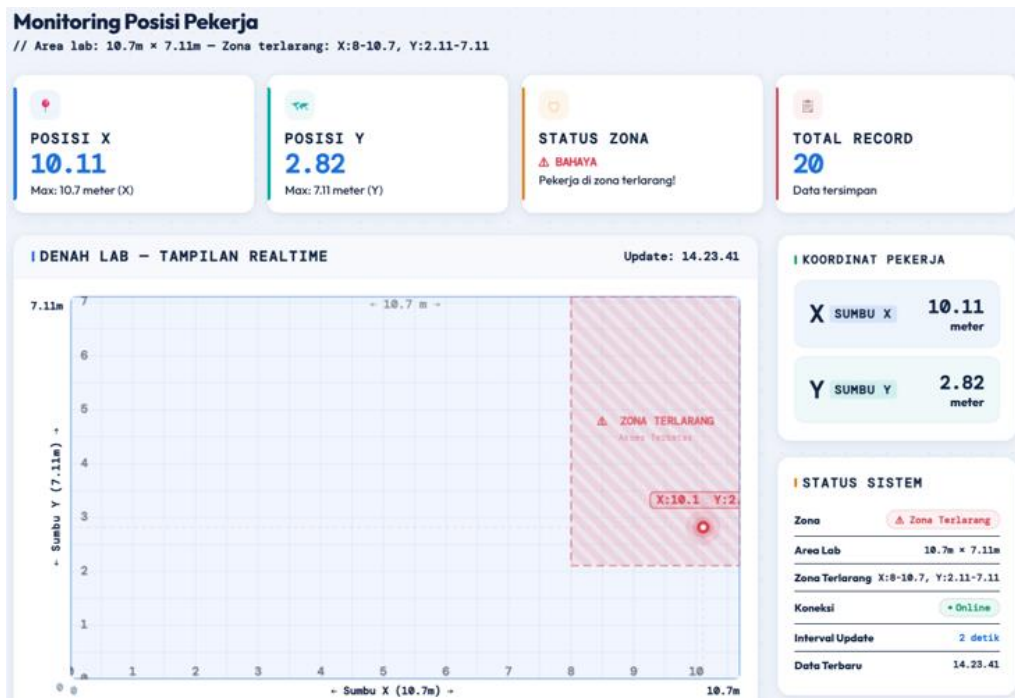
pengujian, yaitu P2, P3, P4, dan P5, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.20. Keempat titik tersebut dipilih karena jalur propagasi sinyal antara anchor dan tag tidak terhalang oleh sekat ruangan sehingga sinyal UWB dapat diterima secara langsung (*Line of Sight*). Selanjutnya, pengujian kondisi NLoS dilakukan pada titik P1, di mana lintasan propagasi sinyal menuju tag terhalang oleh sekat ruangan sehingga anchor 3 tidak memiliki jalur pandang langsung terhadap tag. Selain itu, dilakukan pula pengujian dengan menempatkan tag di dalam ruang sekat pada dua kondisi, yaitu pintu terbuka dan pintu tertutup. Pada kondisi pintu terbuka, sinyal masih dapat merambat melalui bukaan pintu, sedangkan pada kondisi pintu tertutup sinyal harus melewati penghalang berupa pintu dan dinding sekat sehingga kondisi NLoS menjadi lebih dominan.

Selain dipengaruhi oleh keberadaan sekat dan dinding, akurasi sistem juga dapat dipengaruhi oleh efek *multipath*. Pada lingkungan *indoor*, sinyal UWB dapat mengalami pemantulan pada berbagai permukaan seperti dinding, lantai beton, pintu, maupun benda berbahan logam sebelum diterima oleh tag sehingga hasil pengukuran jarak dapat mengalami penyimpangan. Akibatnya, koordinat hasil estimasi posisi yang diperoleh melalui metode trilaterasi berpotensi memiliki nilai *error* yang lebih besar dibandingkan kondisi tanpa penghalang.

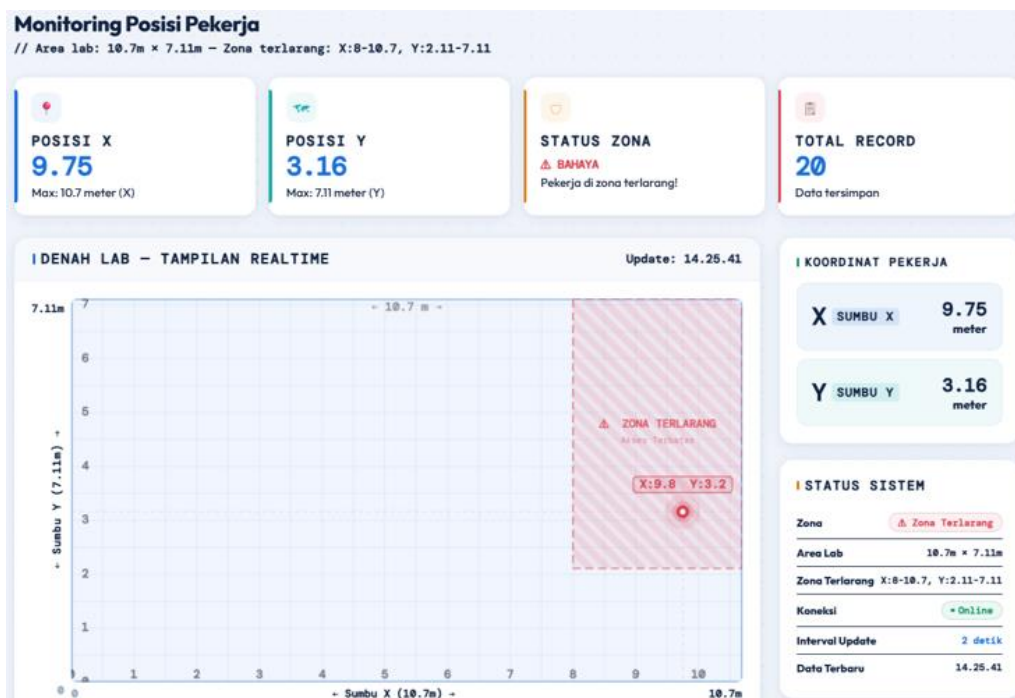
Tabel 4. 26 Hasil Posisi Tag Kondisi NLoS

Kondisi Pengujian	Koordinat Real (X,Y)	Koordinat Posisi Tag (X,Y)
NLoS (Pintu Terbuka)	(10.10, 2.70)	(10.11, 2.82)
NLoS (Pintu Tertutup)	(10.10, 2.70)	(9.75, 3.16)

Berdasarkan Tabel 4.26, pada pengujian kondisi NLoS dengan pintu terbuka diperoleh koordinat posisi tag sebesar (10,11; 2,82), sedangkan pada kondisi NLoS dengan pintu tertutup diperoleh koordinat sebesar (9,75; 3,16). Tampilan hasil monitoring pada kondisi NLoS dengan pintu terbuka ditunjukkan pada Gambar 4.24, sedangkan kondisi NLoS dengan pintu tertutup ditunjukkan pada Gambar 4.25.



Gambar 4. 24 Tampilan Kondisi NLoS (Pintu Terbuka)
(Data Pribadi, 2026)



Gambar 4. 25 Tampilan Kondisi NLoS (Pintu Tertutup)
(Data Pribadi, 2026)

Berdasarkan hasil pengujian, koordinat hasil estimasi pada kondisi NLoS menunjukkan penyimpangan yang lebih besar dibandingkan koordinat *real* dengan persentase error sumbu x 0.10% dan sumbu y 4.44% dalam kondisi pintu tertutup dan persentase error sumbu x 3.47% dan sumbu y

17,04% dalam kondisi pintu ruang sekat terbuka. Hal ini terjadi karena keberadaan sekat dan pintu menghalangi jalur propagasi langsung (*Line of Sight*) antara anchor dan tag. Akibatnya, sebagian sinyal UWB harus melewati atau dipantulkan oleh dinding, pintu, maupun permukaan lain di dalam ruangan sebelum diterima oleh tag. Kondisi tersebut menyebabkan waktu tempuh sinyal menjadi lebih panjang dibandingkan lintasan langsung sehingga hasil pengukuran jarak yang digunakan dalam metode trilaterasi mengalami penyimpangan. Penyimpangan nilai jarak tersebut mengakibatkan koordinat hasil estimasi bergeser dari posisi sebenarnya sehingga nilai *error* menjadi lebih besar dibandingkan kondisi LoS. Meskipun demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem masih mampu mengestimasi posisi tag pada kondisi NLoS sehingga sistem tetap dapat digunakan untuk pemantauan di lingkungan *indoor* yang memiliki sekat, meskipun tingkat akurasi mengalami penurunan dibandingkan kondisi LoS.

4.5 Hasil Perancangan *Website Monitoring*

Website monitoring dirancang sebagai antarmuka (*interface*) untuk memantau posisi pekerja berdasarkan koordinat yang dihasilkan oleh sistem *Indoor Positioning System* (IPS) menggunakan teknologi *Ultra-Wide-Band* (UWB).

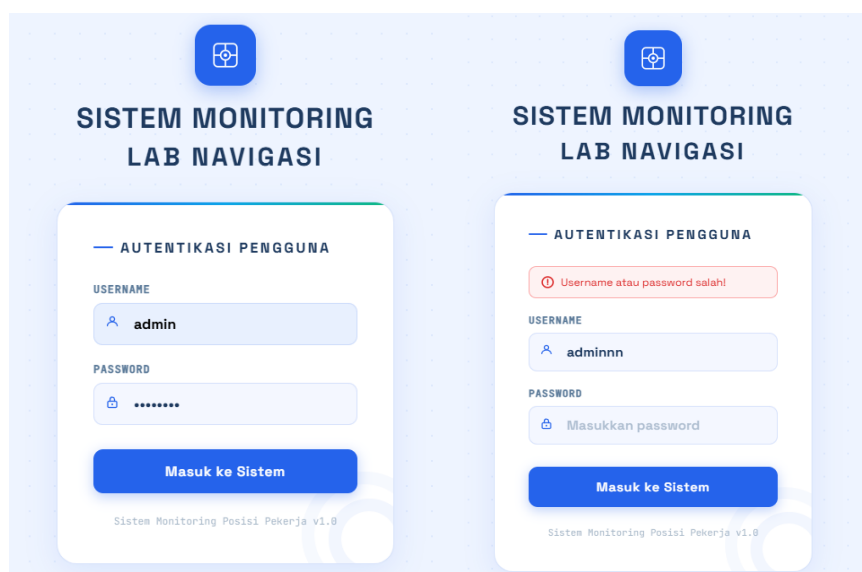
Website ini berfungsi sebagai media bagi teknisi atau operator yang berwenang untuk melakukan pemantauan terhadap posisi pekerja selama berada di area kerja. Oleh karena itu, akses ke *website* tidak diberikan kepada seluruh pengguna, melainkan hanya kepada teknisi atau operator yang memiliki akun dan hak akses sesuai dengan data yang tersimpan pada sistem. Melalui *website monitoring*, teknisi atau operator dapat mengamati posisi pekerja pada denah ruangan, melihat koordinat hasil perhitungan metode trilaterasi, serta memantau status pekerja ketika berada pada zona aman maupun zona terlarang. Informasi tersebut diperbarui secara *real-time* berdasarkan data yang dikirimkan oleh sistem IPS sehingga proses pemantauan dapat dilakukan secara berkelanjutan. Untuk memastikan setiap fitur pada *website* berfungsi sesuai dengan kebutuhan sistem, dilakukan pengujian terhadap beberapa bagian utama yaitu sistem login, database

pengguna, dan halaman utama *website* monitoring.

4.5.1 Sistem Login *Interface Website*

Halaman login merupakan halaman awal yang digunakan sebagai proses autentikasi sebelum pengguna dapat mengakses *website* monitoring. *Website* monitoring hanya dapat diakses oleh teknisi atau operator yang memiliki hak akses, sehingga setiap pengguna diwajibkan melakukan proses login menggunakan *username* dan *password*. Username dan password tidak dibuat melalui halaman *website*, melainkan telah didaftarkan terlebih dahulu oleh administrator pada database MySQL. Oleh karena itu, halaman login tidak menyediakan fitur registrasi atau pembuatan akun baru, karena seluruh proses pengelolaan akun dilakukan langsung melalui database. Mekanisme ini diterapkan untuk menjaga keamanan sistem dan memastikan bahwa hanya pengguna yang berwenang yang dapat mengakses informasi monitoring.

Pada saat pengguna memasukkan username dan password, sistem akan melakukan proses verifikasi dengan mencocokkan data yang dimasukkan terhadap data yang tersimpan pada database MySQL. Apabila data yang dimasukkan sesuai, pengguna akan diarahkan menuju halaman utama *website* monitoring. Sebaliknya, apabila username atau password tidak sesuai, sistem akan menolak proses login dan menampilkan pesan kesalahan sehingga pengguna tidak dapat mengakses sistem.



Gambar 4. 26 Tampilan Halaman Login
(Data Pribadi, 2026)

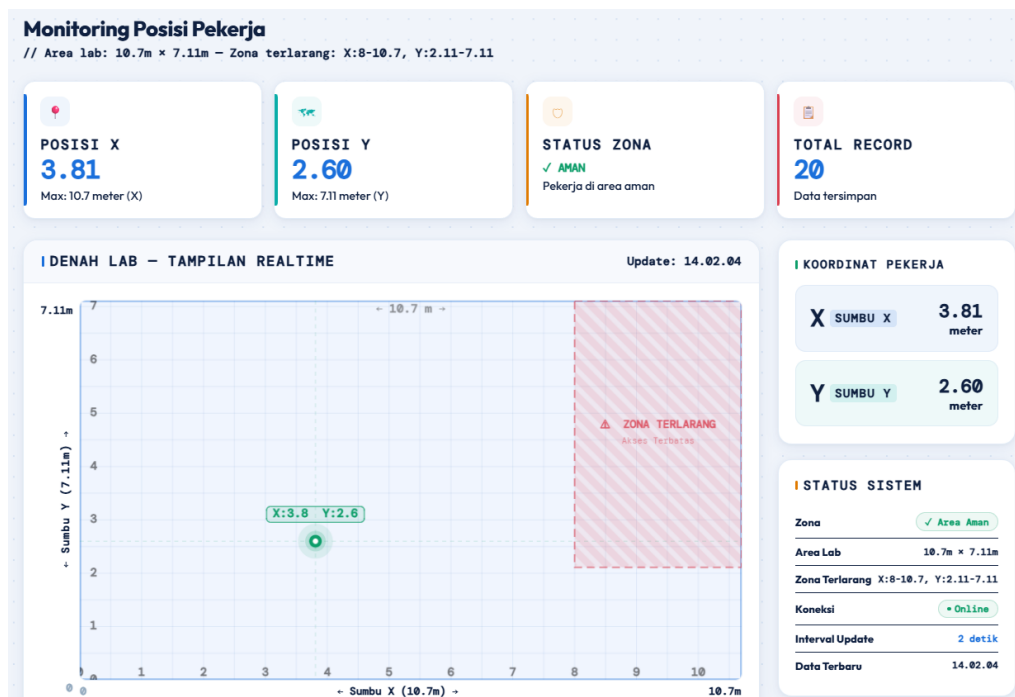
Apabila proses login berhasil pengguna akan diarahkan ke halaman utama monitoring yang menampilkan dashboard sistem dan sebaliknya jika proses login gagal pengguna tidak dapat mengakses halaman utama sistem monitoring.

4.5.2 Tampilan Halaman Utama *Website*

Halaman utama *website* merupakan antarmuka utama yang digunakan oleh teknisi atau operator untuk melakukan pemantauan posisi pekerja berdasarkan data yang dikirimkan oleh sistem *Indoor Positioning System* (IPS). Setelah pengguna berhasil melakukan proses login dengan memasukkan *username* dan *password*, sistem akan menampilkan *dashboard* monitoring yang menyajikan informasi posisi pekerja serta kondisi sistem dalam satu tampilan yang terintegrasi.

Komponen utama pada halaman ini berupa denah area kerja dua dimensi yang merepresentasikan kondisi ruangan sebenarnya. Pada denah tersebut ditampilkan posisi pekerja dalam bentuk *node* tag berwarna hijau yang bergerak sesuai dengan koordinat hasil perhitungan metode trilaterasi menggunakan teknologi UWB. Posisi *node* akan diperbarui secara otomatis setiap kali sistem menerima data koordinat terbaru, sehingga operator dapat memantau perpindahan pekerja secara langsung. Selain menampilkan posisi pekerja, dashboard juga menampilkan zona terlarang (*restricted area*) yang ditandai dengan warna merah pada denah ruangan. Zona ini merupakan area yang hanya dapat diakses oleh teknisi atau operator yang memiliki kewenangan tertentu. Apabila sistem mendeteksi bahwa posisi pekerja berada di dalam zona tersebut, maka *website* akan menampilkan status "Bahaya" sebagai notifikasi visual untuk memberikan peringatan kepada operator sehingga tindakan yang diperlukan dapat segera dilakukan.

Berdasarkan hasil implementasi tampilan halaman utama *website*, seluruh komponen monitoring dapat ditampilkan dalam satu halaman dan saling terintegrasi. Posisi *node* tag dapat diamati melalui denah ruangan, sedangkan informasi status zona dan data hasil pemantauan dapat digunakan sebagai pendukung dalam mengetahui kondisi posisi tag.



Gambar 4. 27 Dashboard Monitoring Sistem
(Data Pribadi, 2026)

Selain menampilkan informasi posisi secara langsung, halaman utama *website* juga menyediakan fitur riwayat data yang digunakan untuk menyimpan dan menampilkan data hasil pemantauan sebelumnya. Riwayat data yang ditampilkan dibatasi pada 20 data terbaru yang diterima oleh sistem. Data tersebut mencakup Posisi X, Posisi Y, zona, dan waktu penerimaan data. Informasi waktu digunakan untuk menunjukkan kapan data posisi diterima dan dicatat oleh sistem, sedangkan informasi zona menunjukkan kondisi area tempat tag berada, seperti zona Aman atau Bahaya. Data pada tabel akan diperbarui mengikuti data monitoring terbaru, sehingga operator dapat melihat perkembangan posisi tag berdasarkan urutan waktu pencatatan. Tampilan riwayat data pada halaman utama *website* ditunjukkan pada Gambar 4.28.

Tabel 4. 27 Riwayat Data

Posisi X	Posisi Y	Zona	Waktu
3.81	2.61	Aman	2026-08-06 13:57:20
3.81	2.61	Aman	2026-08-06 13:57:20
3.81	2.61	Aman	2026-08-06 13:57:20
3.80	2.61	Aman	2026-08-06 13:57:20
3.80	2.61	Aman	2026-08-06 13:57:20

RIWAYAT DATA ESP32				Update: 13.57.20
ID	POSISI X (M)	POSISI Y (M)	ZONA	WAKTU
69360	3.81	2.61	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69379	3.81	2.61	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69378	3.81	2.61	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69377	3.80	2.61	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69376	3.80	2.61	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69375	3.80	2.61	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69374	3.80	2.62	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69373	3.80	2.62	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69372	3.80	2.62	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69371	3.80	2.62	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69370	3.80	2.62	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69369	3.80	2.62	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69368	3.80	2.62	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20
69367	3.80	2.62	✓ Aman	2026-08-06 13:57:20

Gambar 4. 28 Tampilan Riwayat Pengiriman Data
(Data Pribadi, 2026)

Secara keseluruhan, *website* monitoring telah berfungsi sesuai dengan rancangan sistem dan mampu mendukung proses pemantauan posisi pekerja. Dengan adanya tampilan dashboard dan riwayat data yang terintegrasi, teknisi atau operator dapat melakukan pengawasan terhadap posisi pekerja secara lebih mudah, cepat, dan efektif.

4.6 Analisa Implementasi Sistem *Indoor Positioning System* (IPS)

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian yang telah dilakukan, sistem *Indoor Positioning System* (IPS) berbasis *Ultra-Wideband* (UWB) berhasil diimplementasikan dengan mengintegrasikan sistem autentikasi *fingerprint*, komunikasi UWB, metode trilaterasi, serta *website monitoring*. Pengujian pengukuran jarak antara anchor dan tag menunjukkan bahwa rata-rata persentase *error* yang diperoleh pada Anchor 1 sebesar 0,65%, Anchor 2 sebesar 0,39%, dan Anchor 3 sebesar 0,55%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa data jarak dari ketiga anchor dapat digunakan sebagai masukan dalam proses perhitungan posisi menggunakan metode trilaterasi.

Pada proses autentikasi, sensor *fingerprint* berhasil mengenali sidik jari yang telah terdaftar sehingga pengguna memperoleh hak akses untuk memasuki

ruangan. Setelah proses autentikasi berhasil, sistem secara otomatis mengaktifkan proses monitoring dengan menampilkan *node* tag pada *website*. Integrasi antara sistem autentikasi dan sistem IPS menunjukkan bahwa proses pemantauan hanya dapat dilakukan oleh pengguna yang telah berhasil terverifikasi, sehingga keamanan akses terhadap sistem dapat terjaga.

Dalam menentukan posisi pekerja, sistem menggunakan metode trilaterasi berdasarkan data jarak yang diperoleh dari tiga anchor UWB. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode trilaterasi mampu menghitung koordinat posisi tag, meskipun tingkat akurasi dipengaruhi oleh posisi penempatan anchor dan kondisi lingkungan. Dalam menentukan posisi tag, dilakukan pengujian terhadap tiga skenario penempatan anchor dengan lima titik pengujian dan lima kali pengambilan data pada setiap titik. Berdasarkan hasil analisis, skenario 2 dipilih sebagai konfigurasi penempatan anchor optimal karena menghasilkan nilai error koordinat yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi lainnya. Konfigurasi tersebut kemudian digunakan untuk pengujian pada skala ruangan dengan 10 titik pengujian, dan setiap titik dilakukan sebanyak 5 kali pengukuran. Dari pengujian skala ruangan tersebut diperoleh rata-rata persentase *error* pada sumbu X sebesar 3,62% dan sumbu Y sebesar 2,47%. Selain itu, pengujian pada kondisi *Line of Sight* (LoS) dan *Non-Line of Sight* (NLoS) menunjukkan bahwa keberadaan penghalang menyebabkan peningkatan nilai *error*, namun sistem tetap mampu melakukan estimasi posisi di dalam ruangan.

Pada aspek pelacakan secara *real-time*, sistem berhasil memperbarui koordinat posisi tag secara otomatis pada *website* monitoring sesuai dengan data yang diterima. Posisi tag ditampilkan dalam bentuk *node* (titik) pada denah ruangan dan berubah mengikuti perpindahan tag selama proses pengujian berlangsung.

Secara keseluruhan implementasi alat pada penelitian kali ini sistem mampu memberikan akses masuk hanya kepada pengguna yang telah terverifikasi, kemudian melakukan pemantauan posisi pekerja serta menampilkan riwayat data hasil monitoring. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan tidak hanya mendukung proses pengendalian akses ruangan, tetapi juga meningkatkan efektivitas pemantauan pergerakan pekerja di lingkungan *indoor*.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, penelitian ini berhasil mengimplementasikan *Indoor Positioning System* (IPS) menggunakan teknologi *Ultra-Wideband* (UWB) dengan metode trilaterasi sebagai sistem pemantauan posisi pekerja yang terintegrasi dengan sistem autentikasi *fingerprint*. Berdasarkan hasil penelitian, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. *Indoor Positioning System* (IPS) berbasis teknologi *Ultra-Wideband* (UWB) berhasil diimplementasikan menggunakan tiga buah anchor dan satu tag dengan metode trilaterasi sebagai perhitungan koordinat posisi. Sistem mampu menentukan posisi tag di dalam ruangan dan menampilkan hasil estimasi koordinat berdasarkan data jarak yang diperoleh dari komunikasi UWB.
2. Sistem informasi pemantauan pekerja secara berhasil dirancang dan diimplementasikan melalui *website* monitoring. *Website* mampu menampilkan posisi tag pada denah ruangan, koordinat sumbu X dan Y, serta status zona. *Website* juga hanya dapat diakses oleh teknisi atau operator yang memiliki hak akses melalui proses login menggunakan username dan password yang telah terdaftar.
3. Sistem autentikasi pekerja berbasis sidik jari (*fingerprint*) berhasil diintegrasikan dengan sistem *Indoor Positioning System* (IPS). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sidik jari yang telah terdaftar dapat dikenali dengan baik melalui 10 kali percobaan berhasil sehingga pengguna memperoleh hak akses untuk memasuki ruangan. Setelah proses autentikasi berhasil, sistem secara otomatis mengaktifkan proses monitoring dengan menampilkan posisi tag pada *website*. Dengan demikian, proses pemantauan hanya dapat dilakukan setelah pengguna berhasil terverifikasi, sehingga keamanan akses terhadap sistem dapat ditingkatkan.
4. Berdasarkan hasil evaluasi kinerja sistem, penempatan anchor pada Skenario

2 menghasilkan performa terbaik dibandingkan skenario lainnya. Pada pengujian sistem skala ruangan menggunakan 10 titik pengujian dengan 5 kali pengambilan data pada setiap titik, diperoleh rata-rata persentase *error* sebesar 3,62% pada sumbu X dan 2,47% pada sumbu Y. Meskipun teknologi UWB memiliki tingkat akurasi yang tinggi, hasil pengujian menunjukkan masih terdapat penyimpangan posisi yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan *indoor*, seperti keberadaan penghalang (NLoS), efek *multipath* akibat pantulan sinyal pada dinding, lantai, pintu, dan objek di sekitar area pengujian, serta geometri penempatan anchor. Namun demikian, tingkat *error* yang diperoleh masih relatif kecil sehingga sistem tetap mampu melakukan penentuan posisi, pelacakan secara *real-time*, dan pemantauan pergerakan pekerja di lingkungan *indoor* dengan baik.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian yang telah dilakukan, disarankan beberapa langkah untuk pengembangan penelitian selanjutnya sebagai berikut:

1. Mengoptimalkan penempatan anchor agar cakupan area pengukuran lebih merata serta meningkatkan akurasi estimasi posisi, terutama pada area yang memiliki banyak penghalang atau kondisi NLoS.
2. Pengujian sistem dapat diperluas pada berbagai kondisi lingkungan, seperti ruangan bertingkat, area industri yang memiliki banyak material logam, maupun lingkungan dengan jumlah penghalang yang lebih beragam untuk mengetahui performa sistem pada kondisi nyata.
3. Mengembangkan web monitoring dengan menambahkan fitur riwayat pergerakan atau visualisasi lintasan pergerakan (*tracking history*).
4. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem agar mampu melakukan pemantauan beberapa tag (*multi-tag*) secara bersamaan, sehingga sistem dapat digunakan untuk memonitor posisi banyak pekerja secara *real-time* dalam satu area kerja.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Okby, M., Junginger, S., Roddelkopf, T., & Thurow, K. (2024a). UWB-Based Real-Time Indoor Positioning Systems: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*, 14(23), 11005. <https://doi.org/10.3390/app142311005>
- Azhar, A. R., Setiawan, D. A., Yasmin, N. A. A., Putri, T. A., & Nama, G. F. (2024). SISTEM MONITORING KAPASITAS AIR DAN PENGISIAN OTOMATIS BERBASIS IOT MENGGUNAKAN MODUL ESP8266. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 12(1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i1.3966>
- Bottigliero, S., Milanesio, D., Sacconi, M., & Maggiora, R. (2021). A Low-Cost Indoor Real-Time Locating System Based on TDOA Estimation of UWB Pulse Sequences. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1–11. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3069486>
- Cader, A. J., Banks, J., & Chandran, V. (2023). Fingerprint Systems: Sensors, Image Acquisition, Interoperability and Challenges. *Sensors*, 23(14), 6591. <https://doi.org/10.3390/s23146591>
- Che, F., Ahmed, Q. Z., Lazaridis, P. I., Sureephong, P., & Alade, T. (2023). Indoor Positioning System (IPS) Using Ultra-Wide Bandwidth (UWB)—For Industrial Internet of Things (IIoT). *Sensors*, 23(12), 5710. <https://doi.org/10.3390/s23125710>
- Crețu-Sîrcu, A. L., Schiøler, H., Cederholm, J. P., Sîrcu, I., Schjørring, A., Larrad, I. R., Berardinelli, G., & Madsen, O. (2022). Evaluation and Comparison of Ultrasonic and UWB Technology for Indoor Localization in an Industrial Environment. *Sensors*, 22(8), 2927. <https://doi.org/10.3390/s22082927>
- Faizal Abdul Aziz, Hendri Setyawan, & Bagus Esti Tomo. (2025). Implementasi Sistem Keamanan Kendaraan dengan Sensor Fingerprint. *Neptunus: Jurnal Ilmu Komputer Dan Teknologi Informasi*, 3(3), 126–135. <https://doi.org/10.61132/neptunus.v3i3.968>
- J, N. S. C., Wahab, N. H. A., Sunar, N., Ariffin, S. H. S., Wong, K. Y., & Aun, Y. (2022). Indoor Positioning System: A Review. *International Journal of*

- Advanced Computer Science and Applications*, 13(6).
<https://doi.org/10.14569/IJACSA.2022.0130659>
- Jung, A., Schwarzbach, P., & Michler, O. (2025). *Evaluation of Grid-based Uncertainty Propagation for Collaborative Self-Calibration in Indoor Positioning Systems* (Version 1). arXiv.
<https://doi.org/10.48550/ARXIV.2511.10526>
- Kurnia Ar, H. (2025). IMPLEMENTASI IOT PADA SISTEM MONITORING SUHU DAN KELEMBABAN MENGGUNAKAN ESP32, FIREBASE DAN KODULAR. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 9(1), 1781–1787. <https://doi.org/10.36040/jati.v9i1.12874>
- Laksono, D. T. (2026). IMPLEMENTASI KENDALI BERURUTAN OTOMATIS BERBASIS LIMIT SWITCH PADA MODUL PRAKTIKUM PLC OMRON CP1E UNTUK PEMBELAJARAN OTOMASI INDUSTRI. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 14(1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v14i1.8326>
- Liu, L., Zhang, X., & Lin, X. (2022). Recent Developments of Thermal Management Strategies for Lithium-Ion Batteries: A State-of-The-Art Review. *Energy Technology*, 10(6), 2101135. <https://doi.org/10.1002/ente.202101135>
- Purnamasari, D. N., & Saputro, A. K. (2022). SISTEM PENENTUAN POSISI DALAM RUANGAN BERDASARKAN RECEIVE SIGNAL STRENGTH INDICATOR (RSSI). *Jurnal Simantec*, 11(1), 115–122. <https://doi.org/10.21107/simantec.v11i1.19734>
- Rahmatina, R., Aripin, M. N., Ikbal, M., & Deolika, A. (2023). Implementasi Transistor BD139 dan Rangkaian Relay pada Mesin Air. *Journal of Information Technology*, 3(1), 11–18. <https://doi.org/10.46229/jifotech.v3i1.579>
- Ratjhe, Landsiedel, P., Olaf. (2024). Precise Ranging: Modeling Bias and Variance of Double-Sided Two-Way Ranging with TDoA Extraction under Multipath and NLOS Effects. *arXiv*, 2410, 12826.
- Septianti, N., & Rahmadewi, R. (2024). Sistem Komunikasi Antar Arduino Menggunakan Protokol RS485. *Journal of Electrical Engineering and*

- Computer (JEECOM)*, 6(1), 209–218.
<https://doi.org/10.33650/jeeecom.v6i1.8398>
- Sultan, J. (2024). Precision Indoor Positioning with Ultra-Wideband (UWB) Technology. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1(5), 114–118.
<https://doi.org/10.15199/48.2024.05.20>
- Tamami, N. (2021). *Teknik dan Implementasi Trilaterasi*.
- Tamami, N., Sumantri, B., & Kristalina, P. (2021). Local positioning system for autonomous vertical take-off and landing using ultra-wide band measurement ranging system. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 12(1), 18–27.
<https://doi.org/10.14203/j.mev.2021.v12.18-27>
- Tomažič, S. (2021). Indoor Positioning and Navigation. *Sensors*, 21(14), 4793.
<https://doi.org/10.3390/s21144793>
- Wang, Z., Chen, Y., Zhou, Y., Ouyang, J., Xu, S., & Wei, L. (2022). Miniaturized lithium-ion batteries for on-chip energy storage. *Nanoscale Advances*, 4(20), 4237–4257. <https://doi.org/10.1039/D2NA00566B>
- Yu, Y., Niu, Q., Li, X., Xue, J., Liu, W., & Lin, D. (2023). A Review of Fingerprint Sensors: Mechanism, Characteristics, and Applications. *Micromachines*, 14(6), 1253. <https://doi.org/10.3390/mi14061253>
- Zang, L., Jiao, J., Wang, J., Ding, N., Wang, Z., & Min, X. (2024). Angle-Weighted trilateration method fusing multi-data processing technologies in indoor scene. *Digital Signal Processing*, 147, 104417.
<https://doi.org/10.1016/j.dsp.2024.104417>
- Ziegler, M., Kianfar, A. E., Hartmann, T., & Clausen, E. (2023). Development and Evaluation of a UWB-Based Indoor Positioning System for Underground Mine Environments. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 40(4), 1021–1040. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00797-z>

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1 Biodata Mahasiswa

BIODATA MAHASISWA

1. Nama : Rina Adella Pratiwi
2. NRP : 0922040071
3. Program Studi : D4 - Teknik Otomasi
4. Agama : Islam
5. Status : Belum Menikah
6. Alamat Asal : Bongkot, RT 16 RW 02, Peterongan, Jombang
7. Nomor Telepon : 085732474403
8. Jenis Kelamin : Perempuan
9. Email : adellprtwwii@gmail.com
10. Tempat, Tanggal Lahir : Jombang, 30 November 2003
11. Nama Orang Tua/Wali : Soeprapto
12. Alamat Orang Tua/Wali : Bongkot, RT 16 RW 02, Peterongan, Jombang
13. Telepon Orang Tua/Wali : 082143459446
14. Riwayat Pendidikan :



Pendidikan Formal			
Pendidikan	Tahun	Tempat Pendidikan	Jurusan
Diploma 4	2022 - 2026	Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya	Teknik Otomasi
SMA	2019 – 2022	SMAN Jogoroto	MIPA
SMP	2016 – 2019	SMPN 1 Peterongan	-
SD	2010 - 2016	MI Rahmat Sa'id	-

(Halaman ini sengaja dikosongkan)